

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева

П. Г. Михайлов, А. О. Касимов, С. А. Усембаева

СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СРЕДСТВ

Рекомендовано Научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Алматы 2016

УДК 621.396.6 (075.8)

М 69

Рецензенты:

Ожекенов К. А., канд. техн. наук, доц. КазННТУ им. К. И. Сатпаева

Илипбаева Л. Б., канд. техн. наук, доц., АУЭС

Бахтиярова Е. А. канд. техн. наук, доц., КазАТК

Михайлов П. Г.

М 69 Системное проектирование радиоэлектронных средств. Учеб. пособие. / *П. Г. Михайлов, А. О. Касимов, С. А. Усембаева* /—Алматы: КазННТУ им. К.И. Сатпаева, 2016. — С. 1–228. Ил.-91. Табл.-10. Библиог. -74 назв.

ISBN 978–601–228–983–1

Рассмотрены основы проектирования и разработки полупроводниковых пьезочувствительных элементов микроэлектронных датчиков давлений. В частности, представлены общие вопросы измерения давления, пьезоэффекта, принципы проектирования, разработки топологии, термокомпенсации полупроводниковых пьезочувствительных элементов.

УДК 621.396.6 (075.8)

ISBN 978–601–228–983–1

© Михайлов П.Г., Касимов А.О., Усембаева С.А., 2016

© КазННТУ им. К. И. Сатпаева, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Давление является одной из основных величин, связанных с описанием жидких и газообразных сред. Большое разнообразие систем, в том числе и датчиковой аппаратуры, для измерения давлений объясняется тем, что понятие «давление» охватывает протяженную область значений – от сверхвысокого вакуума до сверхвысоких избыточных давлений [15]. По данным различных источников одним из самых многочисленных классов датчиков, используемых в авиационной, ракетно-космической технике, на атомных станциях, в общепромышленной аппаратуре и т. д., являются датчики давлений, в том числе и полупроводниковые, занимающие лидирующие позиции на мировом рынке датчиков [7, 9, 15, 32, 34, 52]. Полупроводниковые технологии применяются для создания датчиков давлений, перемещения, частоты вращения, линейных и угловых ускорений, температуры и др. При этом используются различные принципы преобразования: пьезорезистивный, емкостный, резонансный, индукционный, ионизационный и др. [71]. Однако одним из самых распространенных типов чувствительных элементов для датчиков давлений являются чувствительные элементы на полупроводниковых технологиях, построенные на основе пьезорезистивного эффекта. Это объясняется тем, что в большинстве случаев требуется одновременно обеспечить выполнение требований по нескольким параметрам датчиков – малым габаритным размерам, чувствительности, точности, стабильности выходных характеристик, надежности, долговечности, низкой цене. Наиболее полно таким требованиям, по сравнению с чувствительными элементами на других принципах преобразования, удовлетворяют полупроводниковые пьезорезистивные датчики давлений.

Кроме того, полупроводниковые пьезорезисторы, ведя себя подобно широко известным проволочным или фольговым пьезорезисторам, превосходят их, однако, по своей

пьезочувствительности (коэффициенту K). Коэффициент K у полупроводниковых пьезорезисторов почти на два порядка выше, поэтому в случае продольных деформаций в 0,1 % сопротивление меняется примерно на 10 %. Следовательно, при основном сопротивлении пьезорезистора порядка 100 Ом достигаются абсолютные изменения сопротивления от нескольких до десятков Ом. Столь большие изменения сопротивлений практически устраняют многие трудности, с которыми связано использование проволочных пьезорезисторов, например искажения, вызываемые термо-ЭДС или изменением переходных сопротивлений контактов в подводящих проводах [50].

В современных пьезорезистивных полупроводниковых датчиках давлений измеряемая величина – давление газообразных, жидких или сыпучих сред – преобразуется в электрический сигнал полупроводниковым пьезочувствительным элементом (ППЧЭ), принцип действия которого основан на функциональной зависимости между измеряемым давлением и упругими деформациями чувствительного элемента, преобразующимися в электрический сигнал полупроводниковыми пьезорезисторами. Кроме того, все существующие в настоящее время полупроводниковые пьезорезистивные датчики давлений имеют одно принципиальное общее решение – ППЧЭ с расположенными на нем пьезорезисторами воспринимает измеряемое давление непосредственно, без промежуточного преобразования его в силу. Такие принципы построения сочетают простоту с высокой надежностью, что позволяет разрабатывать датчики давления экономичные и надежные, способные работать в сложных эксплуатационных условиях с минимальной погрешностью. Поэтому в настоящее время существует большое разнообразие конструктивно-технологических решений ППЧЭ для использования их в датчиках давлений различного назначения.

В данном учебном пособии рассматриваются основы проектирования и разработки, а также технологические аспекты изготовления полупроводниковых тензочувствительных элементов датчиков давлений, в частности химическая обработка пластин, окисление, диффузия, травление и др.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ. ДАВЛЕНИЕ КАК ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА

Кинетическая теория газов утверждает, что давление является мерой полной кинетической энергии молекул [47]:

$$p = \frac{2}{3} \frac{KE}{V} = \frac{1}{3} \rho C^2 = NRT,$$

где KE – кинетическая энергия V – объем; ρ – плотность; C^2 – среднее значение квадрата скоростей молекул; N – число молекул в единице объема; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Здесь предполагается, что давление и плотность газов связаны линейной зависимостью, т. е. увеличение давления приводит к пропорциональному росту плотности. Например, при температуре 0 °С и давлении 1 атм плотность воздуха составляет 1,3 кг/м³, в то время как при той же температуре, но давлении 50 атм, его плотность уже будет 65 кг/м³, т. е. в 50 раз больше. В отличие от газов плотность жидкостей мало меняется в широком диапазоне давлений и температур. Например, для воды при температуре 0 °С и давлении 1 атм плотность составляет 1000 кг/м³, в то время как при той же температуре и давлении 50 атм плотность равна 1 002 кг/м³, а при температуре 100 °С и давлении 1 атм плотность равна 958 кг/м³.

Оценивать значение давления можно как в абсолютных, по отношению к вакууму, так и в относительных, по отношению к атмосферному давлению, единицах; кроме того, результат измерения может быть разностью двух произвольных величин – двух разных давлений. Наконец, измерение давления может проводиться в различных средах, физические и химические характеристики которых весьма разнообразны.

Давление – это физическая величина, характеризующая воздействие усилия на единицу площади поверхности тела или условно выделенную внутри тела элементарную площадку [15].

Величина давления p жидкости или газа на стенку сосуда, который они полностью заполняют, определяется силой dF , действующей по нормали к элементу поверхности ds стенки сосуда:

$$p = dF / ds.$$

На жидкость действует также сила тяжести. Поэтому, например, в случае столба жидкости, находящейся в открытой вертикальной емкости, давление в точке на расстоянии h от поверхности равно сумме атмосферного давления p_0 и массы столба жидкости, действующей на единицу площади:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести.

Если на жидкость действует еще какое-либо ускорение, необходимо учитывать также влияние силы инерции на величину давления.

Атмосферное давление p_0 , называемое барометрическим или гравитационным, является следствием земного притяжения, удерживающего частицы воздуха у поверхности Земли. На практике измерения осуществляются чаще всего относительно исходного атмосферного давления. Разность давлений внутри сосуда и атмосферного давления снаружи сосуда называется *избыточным давлением*, причем избыточное давление может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Сумма атмосферного и избыточного давлений называется *абсолютным давлением*.

Барометрическое давление в разных слоях атмосферы зависит от высоты их расположения над уровнем моря и изменяется по экспоненциальному закону:

$$p_H \approx p_0[\exp(-\rho_0/p_0)H],$$

где p_H и p_0 – давления на уровне моря и на высоте H соответственно; ρ – плотность воздуха на уровне моря.

Измерение давления в неподвижных жидкости или газе в замкнутых сосудах, полостях и трубопроводах сводится к измерению силы F , действующей на поверхность S стенки, ограничивающей среду – объект измерения. В движущихся жидкостях или газе различают три вида давления: статическое давление неподвижной среды p_s , динамическое давление p_d , обусловленное скоростью v движущихся жидкости или газа, и полное давление p , представляющее сумму этих двух давлений:

$$p = p_s + p_d$$

Динамическое давление, действующее на поверхность, нормальную направлению течения, увеличивает статическое давление на величину:

$$p_d = \rho v^2 / 2,$$

где v – скорость движения жидкости или газа; ρ – плотность среды.

Отдельной областью является измерение акустических давлений – знакопеременных давлений в жидкостях и газах в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот. Датчики акустических давлений должны реагировать только на переменную составляющую измеряемого давления, т. е. на выходной сигнал не должно влиять атмосферное давление.

Единицей измерения давления и напряжения в системе СИ является паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной на поверхности 1 м² и нормальной к ней. Однако продолжают использоваться внесистемные единицы измерения давления, применение которых обусловлено практическими нуждами.

Иногда в качестве технической единицы измерения давления применяется единица, называемая «атмосфера», обозначаемая 1 атм. Одна атмосфера – это давление, которое оказывает столб воды высотой 1 м на площадку 1 см² при температуре +4 °С и нормальном гравитационном ускорении. Для грубых оценок можно запомнить соотношение: 0,1 мм Н₂О создает давление, приблизительно равное 1 Па. В промышленности применяется другая единица давления, называемая торр (это название дано в честь физика Торричелли), которая определяется как давление, создаваемое столбиком ртути высотой 1 мм при 0 °С, нормальном атмосферном давлении и нормальной гравитации. Идеальное давление атмосферы Земли, равное 760 торр, называется технической атмосферой. В системе единиц США давление измеряется в фунтах-силы на квадратный дюйм. Эта единица там обозначается как psi.

В табл. 1.1 приведен перевод наиболее распространенных единиц измерения давления.

В акустических измерениях уровень звукового давления газовой среды (дБ) обычно оценивается в относительных единицах согласно формуле:

$$N = 20 \lg(p/p_0),$$

где p – эффективное значение акустического давления, Па; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – давление, соответствующее величине интенсивности звукового порога.

Перевод единиц из одной системы в другую, в соответствии с приведенной выше формулой, дан в табл. 1.1.

В зависимости от скорости изменения давления, т. е. характера зависимости $p(\tau)$ все разнообразие задач измерения давлений можно свести к трем вариантам: измерение статических и медленноменяющихся давлений, измерение быстроменяющихся давлений и измерение импульсных давлений.

В промышленности принято к группе статических относить давления, значения которых остаются неизменными за время эксперимента или за время проведения измерений. Медленноменяющееся давление – это процесс, содержащий постоянную составляющую и гармонические составляющие с частотами до 20...30 Гц. К быстроменяющимся и импульсным давлениям относят процессы со случайной и гармонической составляющими в частотном диапазоне от десятков до сотен тысяч раз.

Характер изменения медленноменяющихся давлений во времени различен: $p(\tau)$ может представлять собой сложную функцию, постоянная составляющая которой аппроксимируется, например, трапецеидальным импульсом с различными временами нарастания и спада при наличии вытянутого участка установившегося давления, сопровождаемого пульсацией давлений (рис. 1.1, а) [15].

Быстроменяющиеся давления (рис. 1.1, б) включают периодически меняющиеся переходные процессы. Пульсация давления жидкости и газа и акустические шумы часто представляют собой случайный колебательный процесс (рис. 1.1, в, г).

Таблица 1.1

Перевод единиц из одной системы в другую в соответствии с приведенной выше формулой

дБ	мкбар	кг·с/см ²	Па
80	2	$2 \cdot 10^{-6}$	0,2
86	4	$4 \cdot 10^{-6}$	0,4
92	8	$8 \cdot 10^{-6}$	0,8
98	15	$1,6 \cdot 10^{-5}$	1,6
100	20	$2 \cdot 10^{-5}$	2,0
110	64	$6,4 \cdot 10^{-5}$	6,4
120	200	$2 \cdot 10^{-4}$	20
130	632,4	$6,3 \cdot 10^{-4}$	63,2
140	2000	$2 \cdot 10^{-3}$	200
150	6324	$6,3 \cdot 10^{-3}$	632,4
160	20000	$2 \cdot 10^{-2}$	2000
170	63240	$6,3 \cdot 10^{-2}$	6324
180	$2 \cdot 10^5$	0,2	$2 \cdot 10^4$
190	$6,324 \cdot 10^5$	0,632	$6,324 \cdot 10^4$
200	$2 \cdot 10^6$	2,0	$2 \cdot 10^5$

Импульсные давления имеют вид одиночных или периодически повторяющихся импульсов и характеризуются значительной амплитудой импульсов и короткими временами нарастания и спада процесса. Чаще всего эти процессы не имеют постоянной составляющей (рис. 1.1, δ -жс).

Наиболее жесткие метрологические требования предъявляются к датчикам и системам, измеряющим статические и медленноменяющиеся процессы. Это объясняется тем, что датчики должны с допускаемыми погрешностями одновременно измерять переходные процессы и установившиеся давления, сопровождаемые пульсацией. Эти требования противоречивы и во многих случаях трудно совместимы в одном датчике, т. к. для измерения переходных процессов с малой погрешностью необходимы высокая частота собственных колебаний и малая степень успокоения, а для малой погрешности измерения установившегося давления, сопровождаемого высокой частотной пульсацией, необходимы низкая частота собственных колебаний и большая степень успокоения. Датчики, предназначенные для

измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений, должны обладать малыми динамическими погрешностями, т. е. высокой частотой собственных колебаний и отсутствием механических и электрических резонансов в рабочем диапазоне частот измерения давлений и дестабилизирующих факторов. При этом для обеспечения допускаемых динамических погрешностей системы в целом каждый элемент системы (датчик–усилитель–преобразователь–регистратор) должен быть согласован по частотным диапазонам измерений.

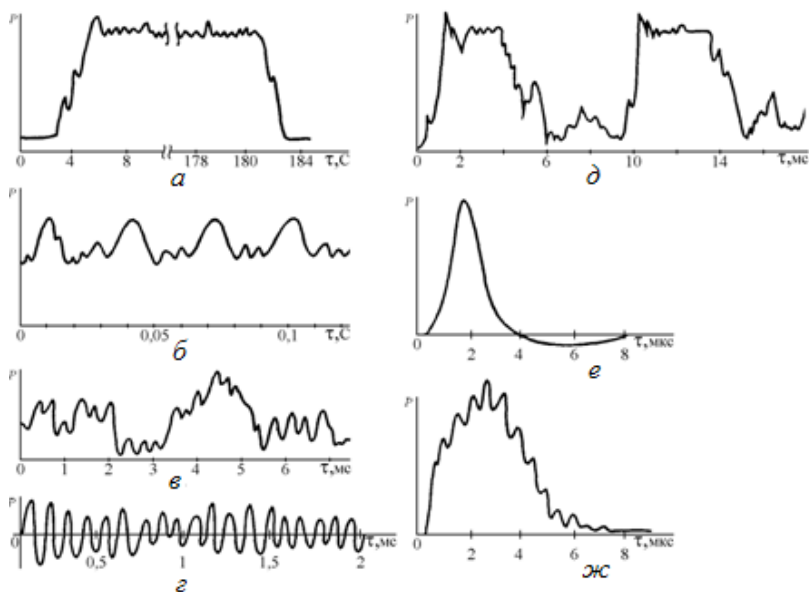


Рис. 1.1. Характер изменения давления во времени:

а – медленноменяющееся давление; б – медленноменяющееся давление, сопровождаемое пульсацией; в – быстроменяющееся давление с постоянной составляющей; г – быстроменяющееся давление без постоянной составляющей; д – импульсное давление; е, жс – ударное или взрывное давление в рабочем диапазоне частот измерения давлений и дестабилизирующих факторов

Таким образом, все задачи измерения давления можно разделить на следующие основные группы: измерение

абсолютного или избыточного давления и измерение разности давлений. Отдельно следует выделить задачи измерения давления газов в пределах не выше атмосферного – вакуумметрию – и измерение параметров звуковых волн в газовой и жидкостной среде – акустические измерения. А в зависимости от скорости изменения давления, задачи измерения давлений можно свести к трем вариантам: измерение статических и медленноменяющихся давлений, измерение быстроменяющихся давлений и измерение импульсных давлений.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЬЕЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ

В данной части учебного пособия будут представлены и проанализированы наиболее типичные ППЧЭ с точки зрения конструкции и топологии в зависимости от типа и диапазона измеряемого давления, а также требований по техническим параметрам и характеристикам датчиков давлений, имеющих в своем составе данные ППЧЭ.

Перед представлением основ построения ППЧЭ датчиков давлений в целом рассмотрим в общем виде конструкцию и принцип работы одного, отдельно взятого ППЧЭ с целью дальнейшего детального описания компонентов и принципов построения типичных ППЧЭ датчиков давлений. В качестве примера возьмем ППЧЭ датчика абсолютного давления, представленного на рис. 2.1.

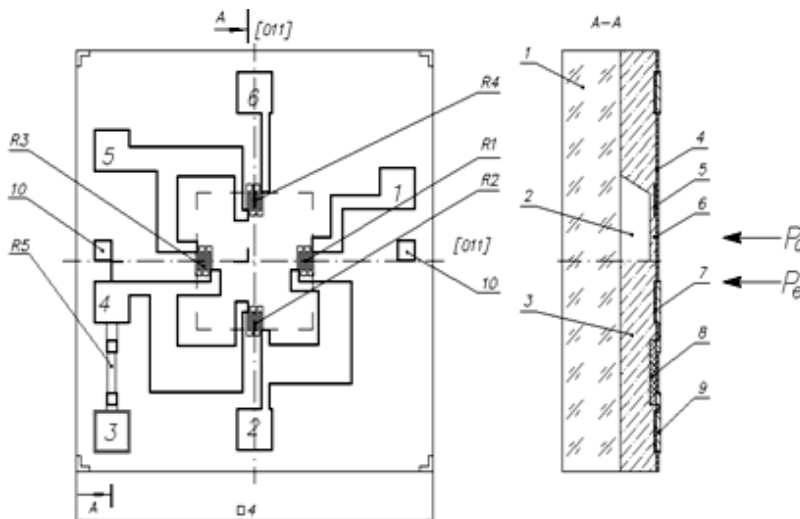


Рис. 2.1. ППЧЭ датчика абсолютного давления:

- 1 – стеклянное основание; 2 – вакуумируемая полость; 3 – кремниевая подложка; 4 – слой двуокиси кремния; 5 – пьезорезисторы;
- 6 – мембрана; 7 – коммутационные шины; 8 – терморезистор;
- 9 – контактные площадки; 10 – знаки совмещения

ППЧЭ состоит из двух частей: стеклянного основания 1 и кремниевой подложки (кристалла) 3, соединенных электростатическим методом. Между ними сформирована вакуумированная полость 2, обеспечивающая наличие в конструкции ППЧЭ так называемого опорного давления. Это необходимо для обеспечения измерения абсолютного давления (см. п. 1), когда избыточное давление, воздействуя на ППЧЭ с одной стороны (в данном случае со стороны пьезорезисторов (P_e на рис. 2.1)), суммируется с атмосферным давлением (P_0 на рис. 2.1), которое также воздействует на ППЧЭ лишь с одной, той же самой, стороны что обусловлено существованием с противоположной стороны вакуума, не оказывающего влияния на ППЧЭ по причине воздействия избыточного или атмосферного давлений. Таким образом, избыточное давление, суммируясь с атмосферным, образует абсолютное. Причем не важно, с какой стороны кристалла располагается вакуумированная полость; необходимо лишь, чтобы P_0 и P_e воздействовали на него одновременно с одной стороны. Соответственно конструкция любого ППЧЭ для измерения избыточных давлений должна предусматривать возможность воздействия атмосферного давления на обе стороны кристалла, а измеряемого (т. е. избыточного) – только на одну. Принцип работы ППЧЭ заключается в следующем. Измеряемая величина – давление, воздействуя на мембрану 6, деформирует пьезорезисторы 5, расположенные на мембране в местах наибольших поверхностных механических напряжений и увеличивает разбаланс мостовой схемы, в которую замкнуты пьезорезисторы с помощью коммутационных шин 7, и таким образом получается выходной электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению, изменяющемуся под воздействием давления.

Далее подробно остановимся как на компонентах представленного ППЧЭ, указанных на рис. 2.1, так и компонентах, не вошедших в его состав, но играющих немаловажную роль в конструкциях других ППЧЭ для измерения разных типов давлений, их функциональном назначении и принципах построения.

2.1. Общие сведения о кремнии. Индексы Миллера

В настоящее время и в обозримом будущем кремний останется основным материалом для производства ППЧЭ датчиков давлений. Это объясняется рядом его уникальных физических и химических свойств.

Кремний как исходный материал доступен и дешев, а технология получения, очистки, обработки и легирования и тому подобное хорошо разработана, что обеспечивает высокую степень кристаллографического совершенства изготавливаемых структур. По этому показателю кремний намного превосходит сталь.

Кремний обладает хорошими механическими свойствами. По значению модуля Юнга кремний приближается к нержавеющей стали и намного превосходит кварц и различные стекла. По твердости кремний близок к кварцу и почти вдвое превосходит железо. Монокристаллы кремния имеют предел текучести, который в три раза больше, чем у нержавеющей стали. Однако при деформации он разрушается без видимых изменений размеров, тогда как металлы обычно претерпевают пластическую деформацию. Причины разрушения кремния связаны со структурными дефектами кристаллической решетки, в основном расположенными на поверхности монокристаллов кремния. Полупроводниковая промышленность успешно решает проблему высококачественной обработки поверхности кремния, так что зачастую кремниевые механические компоненты (например, упругие элементы в сенсорах давления) превосходят по прочности сталь (табл. 2.1).

Монокристаллический кремний представляет собой твердый и хрупкий материал, упруго деформирующийся до достижения своего предела текучести – в этой точке происходит разрушение. Предел текучести кремния равен 7 ГПа, что эквивалентно массе 700 кг, подвешенной на площади 1 мм². И предел прочности на разрыв, и твердость являются показателями сопротивления материала пластической деформации. Следовательно, они приближенно пропорциональны.

Деформация материала, возникающая при повышенных температурах и статических напряжениях, называется ползучестью. Она определяется как зависящая от времени необратимая деформация материала под действием постоянной нагрузки.

Таблица 2.1

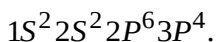
Характеристики основных материалов микроэлектроники

Материал	Предел текучести, 10^9 Па	Твердость, кг/мм ²	Модуль Юнга, 10^{11} Па	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового Расширения, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Кремний (Si)	7,0	850	1,9	2,3	2,33
Высококачественная легированная сталь	4,2	1500	2,1	7,9	12
Обычная сталь	2,1	660	2,0	7,9	17,3
Алмаз	53	7000	10,35	3,5	1,0
Карбид кремния (SiC)	21	2480	7,0	3,2	3,3
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	14	3486	2,7–2,8	3,1	1,6–2,8
Алюминий (Al)	0,17	130	0,7	2,7	25

Кремний не демонстрирует ни пластической деформации, ни ползучести при температурах ниже 500 °С; поэтому кремниевые датчики по сути не подвержены усталостному разрушению при высоких циклических нагрузках. (Кремниевые чувствительные элементы подвергались циклированию при более 100 млн. циклов без наблюдаемых разрушений.) Эта их способность выдерживать огромное число рабочих циклов объясняется тем, что в кремнии при комнатной температуре отсутствует механизм поглощения энергии или выработки тепла из-за межкусталлитного сдвига или смещения дислокаций. Однако при приложении нагрузки свыше предела текучести из-за хрупкости происходит катастрофическое разрушение

монокристаллического кремния, а не пластическая деформация, как у металлов. При комнатной температуре материалы с высоким модулем упругости, например, Si, SiO₂ и Si₃N₄, часто проявляют линейно-упругие свойства при более низких нагрузках и резко переходят к хрупкому разрушению при более высоких нагрузках. Пластическая деформация в металлах имеет в своей основе генерацию вызванных напряжением дислокаций на границах зерен и последующую миграцию этих дислокаций, которая приводит к макроскопической деформации из-за межкристаллитных сдвигов в материале. В монокристаллическом кремнии границы зерен отсутствуют, и пластическая деформация может возникнуть только из-за миграции дефектов, изначально имеющих в решетке, или дефектов, появившихся у поверхности. Поскольку в монокристаллическом кремнии количество этих дефектов очень мало, этот материал можно считать совершенно упругим при нормальных температурах. Совершенная упругость подразумевает пропорциональность между напряжением и деформацией (т. е. нагрузкой и прогибом) и отсутствие необратимости или механического гистерезиса. Отсутствие неупругого поведения объясняет также крайне низкие механические потери в монокристаллическом кремнии. При повышенных температурах, а в металлах и полимерах и при обычных температурах, в диаграммах напряжений-деформаций могут возникать сложные изменения. Существенная пластичность может быть вызвана в монокристаллическом кремнии при высоких (более 800 °С) температурах, когда кремний заметно размягчается, а подвижность дефектов в решетке значительно возрастает. Для исключения пластической деформации кремниевых пластин важно на высокотемпературных этапах избегать пленок, обычно оксидных или нитридных, которые могут асимметрично напрягать или даже деформировать пластину.

Кремний является элементом четвертой группы периодической системы Д. И. Менделеева и имеет порядковый номер 14. Электроны в атоме распределены по состояниям следующим образом:



Первая цифра – номер энергетического уровня, латинские буквы характеризуют квадрат момента количества движения электрона вокруг ядра:

$$M^2 = \hbar^2 l(l+1),$$

где $\hbar$ – постоянная Планка; l – орбитальное число, $l = 0, 1, 2, \dots$. Для S -состояния $l = 0$, для P -состояния $l = 1$.

Цифра в показателе латинской буквы показывает, сколько электронов имеет данное значение M^2 на указанном энергетическом уровне. Третий энергетический уровень является валентным, и валентность кремния равна 4. Более высокие энергетические уровни в обычных условиях являются пустыми. При объединении атомов кремния в кристалл образуется упорядоченная кристаллическая решетка, имеющая структуру алмаза (рис. 2.2).

В решетке такого типа каждый атом помещен в центре правильного тетраэдра и окружен четырьмя ближайшими атомами, находящимися в его вершинах (см. рис. 2.2, где тетраэдр выделен штриховыми линиями). Решетку алмаза можно рассматривать как наложение двух гранецентрированных решеток, сдвинутых друг относительно друга на $\frac{1}{4}$ пространственной диагонали. Из рассмотрения расположения выделенного атома кремния и его ближайших соседей неясно, какой симметрией в целом обладает кристаллическая решетка. Принято выделять кубическую ячейку с размером стороны $a = 3,57 \text{ \AA}$, которая принимается за элементарную ячейку кремния.

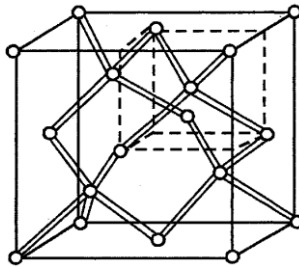


Рис. 2.2. Элементарная ячейка кремния

Таким образом, число атомов кремния в кубическом сантиметре составляет значение примерно $5 \cdot 10^{22}$. Из 18 атомов, показанных на рис. 2.2, одной элементарной ячейке принадлежат только восемь, учитывая, что у атома, расположенного в вершине куба, элементарной ячейке принадлежит лишь $1/8$ его часть, а у атома, расположенного на грани, – половина. Кристалл, построенный из элементарных ячеек, изображенных на рисунке, обладает кубической симметрией. Согласно принципу Неймана, такую же симметрию должны иметь и физические свойства кристалла, например электропроводность или упругость кремния. Связь атома в кристаллической решетке кремния обусловлена специфическими обменными силами, возникающими в результате попарного объединения валентных электронов у смежных атомов. Такая связь (при которой каждый из атомов остается нейтральным) называется ковалентной.

Регулярность структуры кристалла приводит к зависимости его свойств от направления в кристаллической решетке – к анизотропии. Расположение кристаллических плоскостей, в которых находятся атомы, удобно характеризовать не в абсолютных единицах – в ангстремах, микронах или сантиметрах, а в относительных. Для этой цели широко используются индексы Миллера (h, k, l). Будем измерять отрезки, отсекаемые кристаллографической плоскостью на осях системы координат $x_1x_2x_3$, связанной со сторонами элементарной ячейки, в единицах постоянной решетки h_1, h_2, h_3 вдоль указанных осей (для обозначения осей (направлений) индексы Миллера заключают в квадратные скобки: $[hkl]$, а для соответствующих плоскостей – в круглые скобки: (hkl)). Пусть S_1, S_2, S_3 – соответствующие числа. Составим соотношения $1/S_1 : 1/S_2 : 1/S_3$ и выразим их через отношение трех наименьших целых чисел, которые и называются индексами Миллера для плоскости:

$$\frac{1}{S_1} : \frac{1}{S_2} : \frac{1}{S_3} = h : k : l.$$

На рис. 2.3 показана ориентация важнейших кристаллических плоскостей и приведены их индексы Миллера [12, 34].

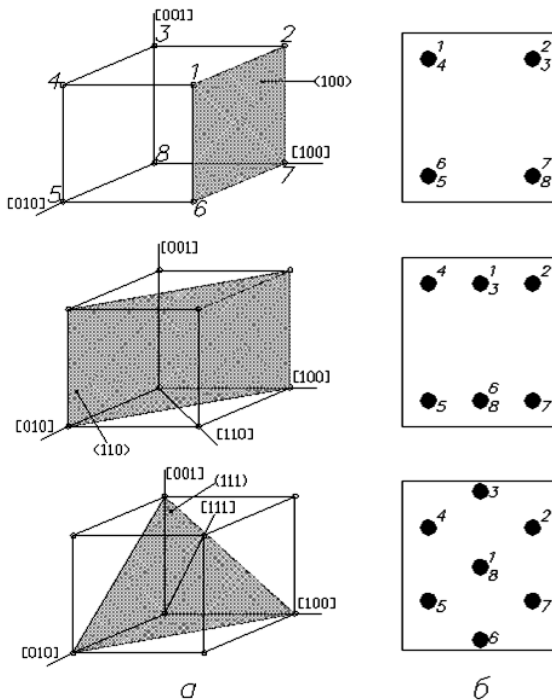


Рис. 2.3. Ориентация важнейших кристаллических плоскостей и их индексы Миллера:

а – происхождение индексов Миллера; б – расположение атомов в кристаллографических плоскостях

Заданные индексы определяют не одну, а целое семейство параллельных плоскостей. Совокупность физически эквивалентных плоскостей обозначается символом $\{hkl\}$, а физически эквивалентных направлений – $\langle hkl \rangle$. Примером могут служить шесть граней куба $\{100\}$: $[100]$, $[\bar{1}00]$, $[00\bar{1}]$, $[010]$, $[0\bar{1}0]$, $[001]$. Цифра 0 в индексах Миллера означает параллельность

плоскости какой-либо из осей. Если точка пересечения грани с одной из осей находится на отрицательном направлении последней, то соответствующий индекс обозначается чертой над индексом.

Так, индексы задней грани – $(\bar{1}00)$, левой – $(0\bar{1}0)$ и нижней – $(00\bar{1})$. Происхождение индексов Миллера показано на рисунках применительно к простейшей кубической решетке. Отрезки, отсекаемые данной плоскостью на осях координат, измеряют в единицах постоянной решетки: $x = S_1h$, $y = S_2h$, $z = S_3h$, где S_1 , S_2 , S_3 – целые числа. Затем обратные величины S_1^{-1} , S_2^{-1} , S_3^{-1} приводят к общему наименьшему знаменателю, и знаменатель отбрасывают; тогда числители образуют индексы Миллера для данной плоскости.

Каждой кристаллографической плоскости свойственна своя плотность атомов на единицу площади. Например, если «посмотреть» на кристалл с кубической решеткой перпендикулярно к плоскостям (100) , (110) и (111) , то расположение атомов в поле зрения будет таким, как показано на рис. 2.3, б (для ясности узловые атомы пронумерованы). Наибольшая плотность атомов соответствует плоскости (111) , наименьшая – плоскости (100) . Если принять за единицу плотность упаковки атомами плоскости (100) , то отношение между плотностями упаковки трех главных кристаллографических плоскостей в решетке кремния будет: $(100):(110):(111) = 1:1,4:2,3$. У кремния плоскость (111) является плоскостью спайности: по ней, как правило, распространяются трещины, и происходит раскалывание кристалла.

Для разных кристаллографических плоскостей оказываются разными многие свойства и параметры кристалла: оптические свойства, скорость травления и др. Поэтому пластины для изготовления ППЧЭ датчиков давлений шлифуют точно по заранее заданной кристаллографической плоскости, используя для контроля дифракцию рентгеновских лучей [11].

Для ППЧЭ датчиков давлений большое практическое значение имеют пластины с ориентацией (100) и (110) . Пластины ориентации (111) не могут быть обработаны с использованием

анизотропного травления (за исключением анизотропного травления с использованием технологии создания дефектов лазерным излучением [53, 58]). Для большей наглядности на рис. 2.4 и 2.5 показаны формы кристаллов, если бы они были собраны из граней различных ориентаций.

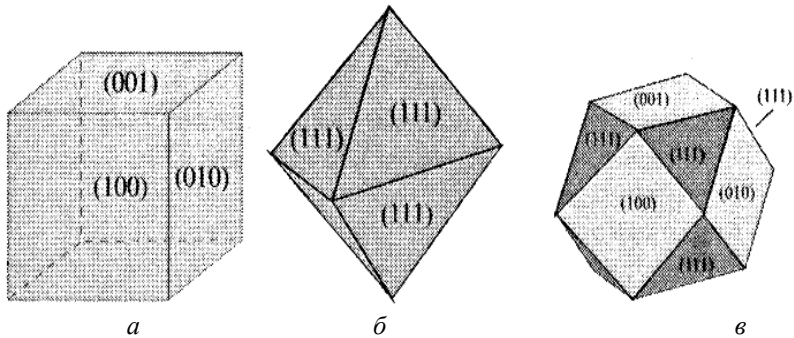


Рис. 2.4. Преобладание в кристаллах различных граней:
 $a - \{100\}$; $б - \{111\}$; $в - \{100\}$ и $\{111\}$

В табл. 2.2 представлены аналитические выражения, характеризующие анизотропию модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига для кремния в плоскостях (100), (110), (111) [7].

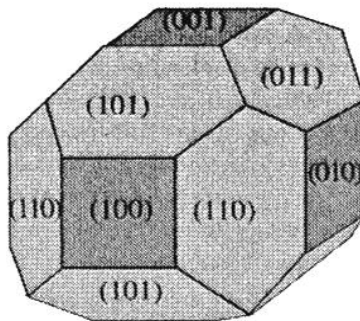


Рис. 2.5. Грани $\{100\}$ и $\{110\}$ на кубе

Таблица 2.2

Аналитические выражения, характеризующие анизотропию модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига для кремния в плоскостях (100), (110), (111)

Параметр	Плоскость		
	(100)	(110)	(111)
Модуль Юнга E , $1 \cdot 10^{11}$ Па	$\frac{11,36}{7,73 + \cos 4\theta}$	$\frac{15,15}{9,3 + 1,33\cos 2\theta + \cos 4\theta}$	1,69
Модуль сдвига G , $1 \cdot 10^{11}$ Па	$\frac{2,84}{4,57 - \cos 4\theta}$	$\frac{3,79}{5,77 - \cos 4\theta}$	0,67
Коэффициент Пуассона, ν	$\frac{1,43 + \cos 4\theta}{7,73 + \cos 4\theta}$	$\frac{2,24 + \cos 4\theta}{9,3 + 1,33\cos 2\theta + \cos 4\theta}$	0,358

Все вышесказанное относится к монокристаллическому кремнию, являющемуся основным материалом при построении ППЧЭ датчиков давлений [12, 34]. Кроме монокристаллического, некоторое использование находит поликристаллический кремний, представляющий собой предельный случай беспорядочных дислокаций (смещение плоскостей кристаллической решетки) и дефектов в монокристаллическом кремнии, и состоящий из множества монокристаллических зерен (микрокристаллов) с разной ориентацией, тесно примыкающих друг к другу. В поликристаллах отсутствует регулярность структуры и свойственная ей анизотропия свойств. Поликристаллы могут иметь мелко- и крупнозернистую структуру.

От размеров зерен зависят многие электрофизические свойства, например, электропроводность. Чем крупнее зерна, тем меньше роль границ между зернами и тем, в частности, меньше удельное сопротивление поликристалла. Однако, поскольку микроструктура поликристаллов практически неконтролируема, воспроизводимость (повторяемость) их электрофизических свойств несравненно хуже, чем у монокристаллов. С другой стороны, поскольку поликристалл сам по себе содержит множество дефектов, то он оказывается сравнительно индифферентным к появлению новых дефектов, например, при

нуклонном облучении. Отсюда – повышенная радиационная стойкость поликристаллов и элементов на их основе. Но, в общем, поликристаллы не стали основой при построении активных элементов большинства ППЧЭ датчиков давлений и в основном играют вспомогательную роль, а ППЧЭ на основе поликристаллического кремния используются в основном при разработке средств измерений специального назначения, когда выигрыш в приоритетных показателях, например, радиационной стойкости, компенсирует их недостатки [23].

2.2. Пьезоэффект и его математическое описание

Из предыдущего краткого описания принципа работы ППЧЭ (см. п. 2) становится понятно, что в основе построения любого ППЧЭ лежит использование пьезорезисторов в качестве компонентов, преобразующих механическое напряжение в электрический сигнал. Поэтому детальное рассмотрение составляющих любого, в том числе и упомянутого ППЧЭ, целесообразно начать именно с пьезорезистора как основного компонента всей конструкции в целом. В общем виде пьезорезистор – это резистор, изменяющий свое сопротивление при деформации, вызванной механическими напряжениями. Данное явление получило название пьезоэффекта.

Под воздействием продольного механического напряжения пьезорезистор изменяет свое поперечное сечение, длину и удельное электрическое сопротивление. Следовательно, изменение общего сопротивления обусловлено двумя факторами: изменением геометрических размеров и изменением удельного электрического сопротивления. Зависимость между этими величинами можно представить следующим образом [50]:

$$R(\varepsilon) = \frac{\rho(\varepsilon)l(\varepsilon)}{A(\varepsilon)},$$

где ε – деформация (относительное изменение длины); ρ – удельное электрическое сопротивление; l – длина; A – площадь поперечного сечения.

При $\rho(\varepsilon)=\rho_0(1+\pi\varepsilon)$, $l(\varepsilon)=l_0(1+\varepsilon)$ и $A(\varepsilon)=A_0(1-\nu\varepsilon)^2$ получаем:

$$R(\varepsilon) = \frac{\rho_0 l_0 + \rho_0 l_0 \pi \varepsilon + \rho_0 l_0 \varepsilon + \rho_0 l_0 \pi \varepsilon^2}{A_0 - A_0 2\nu \varepsilon + A_0 \nu^2 \varepsilon^2},$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Для малых относительных деформаций ε , т. е. пренебрегая членами с ε^2 и учитывая, что начальное электрическое сопротивление проводника равно $R_0 = l_0 \rho_0 / A_0$, получаем:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + \pi) \varepsilon = K \varepsilon. \quad (2.1)$$

Коэффициент $(1 + 2\nu + \pi)$, называемый коэффициентом пьезочувствительности, является мерой чувствительности пьезорезистора и обозначается через K . Иначе формула (2.1) запишется

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R}. \quad (2.2)$$

Так как коэффициент Пуассона ν у металлов равняется примерно 0,3, а вклад изменения удельного электрического сопротивления (определяемого значением коэффициента π) в общее изменение сопротивления пьезорезистора составляет 20 %, то коэффициент K для проволочных пьезорезисторов приблизительно равен 2. Аналогичный эффект был обнаружен у полупроводниковых материалов при исследовании воздействия на них механических напряжений [68]. Существенное отличие от металлов заключается, однако, в том, что значение коэффициента π велико и общее изменение сопротивления почти на 98 % обусловлено изменением удельного электрического сопротивления и только на 2 % связано с изменением геометрических размеров. В результате чувствительность K полупроводниковых пьезорезисторов достигает значений порядка 50–150. Такая большая чувствительность является существенным преимуществом подобных пьезорезисторов. Их основной недостаток заключается в зависимости сопротивления и чувствительности от температуры.

Следует подчеркнуть, что здесь рассматривается чисто объемный эффект, т. е. в преобразовании принимает участие весь

объем полупроводника. Тот известный факт, что изменение механического напряжения, приложенного к p - n -переходу, приводит к изменению электрических характеристик этого перехода, здесь не рассматривается.

Исходным пунктом наших рассмотрений является уравнение электропроводности в общем виде с учетом анизотропии, устанавливающее связь между компонентами вектора напряженности поля E , компонентами вектора плотности тока j_k и компонентами механического тензора напряжения. Разлагая правую часть этого уравнения в ряд Тейлора в точке $j_k = 0$, $T_{lm} = 0$ вплоть до членов второго порядка, получаем следующее выражение:

$$E_i(j_k, T_{lm}) = E_i(0, 0) + \left[\left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right]_{0,0} j_k + \left[\left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \right]_{0,0} T_{lm} +$$

$$+ \frac{1}{2!} \left\{ \left[\left(\frac{\partial}{\partial j_n} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right)_{T_{lm}} \right]_{0,0} j_n j_k + \left[\left(\frac{\partial}{\partial T_{op}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \right)_{j_k} \right]_{0,0} T_{op} T_{lm} + \right.$$

$$\left. + 2 \left[\left(\frac{\partial}{\partial T_{lm}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right)_{j_k} \right]_{0,0} T_{lm} j_k \right\} + \dots,$$

где $i, k, l, m, n, o, p = 1, 2, 3$.

Частные производные имеют следующий наглядный смысл:

$$\left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \equiv \rho_{ik} - \text{компонента удельного сопротивления}; \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \equiv d_{ilm} - \text{пьезоэлектрические коэффициенты}; \quad (2.4)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial j_n} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right]_{T_{lm}} = \left(\frac{\partial \rho_{ik}}{\partial j_n} \right)_{T_{lm}} - \text{зависимость удельного сопротивления от плотности тока;} \quad (2.5)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial T_{op}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \right]_{j_k} = \left(\frac{\partial d_{ilm}}{\partial T_{op}} \right)_{j_k} - \text{зависимость пьезоэлектрических коэффициентов от механического воздействия} \quad (2.6)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial T_{lm}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial j_k} \right)_{T_{lm}} \right]_{j_k} = \left(\frac{\partial \rho_{ik}}{\partial T_{lm}} \right)_{j_k} \equiv \pi_{iklm} - \text{коэффициенты пьезосопротивления} \quad (2.7)$$

В кристаллах кубической симметрии из девяти компонент тензора удельного сопротивления (см. уравнение (2.3)) шесть равны нулю, а остальные три равны между собой. Это означает изотропию удельного сопротивления для такого полупроводникового материала, как кремний.

Согласно работе [62], коэффициенты уравнения (2.4) для кристаллографического класса 32 тождественно равны нулю, а тем самым равны нулю и их частные производные в уравнении (2.6). То же можно сказать о компонентах уравнения (2.5).

Помимо удельного сопротивления, остаются лишь коэффициенты π_{iklm} , которые представляют особый интерес. Таким образом, уравнение электропроводности для описываемого здесь случая принимает следующий вид:

$$E_i(j_k, T_{lm}) = [\rho(j_k, T_{lm})]_{0,0} \delta_{ik} j_k + [\pi_{iklm}(j_k, T_{lm})] T_{lm} j_k + \dots$$

Поскольку величина $[\rho(j_k, T_{lm})]_{0,0}$ до механического воздействия имеет каждый раз определенное начальное значение, вводим для нее обозначение $\rho^{(0,0)}$ ($\rho^{(0,0)}$ – удельное сопротивление при $j = T = 0$). Аналогично и для $[\pi_{iklm}(j_k, T_{lm})]_{0,0} = \pi_{iklm}^{(0,0)}$ и $\delta_{ik} j_k = j_i$. Тогда имеем

$$E_i = \rho^{(0,0)} j_i + \pi_{iklm}^{(0,0)} T_{lm} j_k. \quad (2.8)$$

Развернутая запись уравнения (2.8), отнесенная к кристаллографическим осям кубической системы, с учетом некоторых вычислительных операций, подробно описанных в работе [62] (прежде всего замена индексов: 11 на 1; 22 на 2; 33 на 3; 23 на 4; 13 на 5 и 12 на 6) и приводящих к упрощению записи для значений π_{iklm} и T_{lm} , принимает следующий вид:

$$\frac{E_1}{\rho_{0,0}} = j_1[1 + \pi_{11}^{0,0}T_1 + \pi_{12}^{0,0}(T_2 + T_3)] + \pi_{44}^{0,0}[j_2T_6 + j_3T_5];$$

$$\frac{E_2}{\rho_{0,0}} = j_2[1 + \pi_{11}^{0,0}T_2 + \pi_{12}^{0,0}(T_1 + T_3)] + \pi_{44}^{0,0}[j_1T_6 + j_3T_4];$$

$$\frac{E_3}{\rho_{0,0}} = j_3[1 + \pi_{11}^{0,0}T_3 + \pi_{12}^{0,0}(T_1 + T_2)] + \pi_{44}^{0,0}[j_1T_5 + j_2T_4].$$

Эти уравнения можно теперь применить к конкретным случаям, как показано ниже.

Продольный эффект.

В направлении одной кристаллографической оси действует нормальное напряжение, например T_1 , ток также течет в направлении 1 (плотность тока j_1). Тогда при $T_1 \neq 0$; $T_2 \dots T_6 = 0$; $j_1 \neq 0$; $j_2 = j_3 = 0$ получаем:

$$\frac{E_1}{\rho_{0,0}} = j_1[1 + \pi_{11}^{0,0}T_1].$$

Поперечный эффект.

В направлении одной кристаллографической оси действует нормальное напряжение, например T_1 , ток течет в перпендикулярном к нему направлении, например 2. Тогда при $T_1 \neq 0$; $T_2 \dots T_6 = 0$; $j_2 \neq 0$; $j_1 = j_3 = 0$, так как E_i имеет то же направление, что и j , получаем

$$\frac{E_2}{\rho_{0,0}} = j_2[1 + \pi_{12}^{0,0}T_1].$$

Сдвиговой эффект.

Действует сдвиговое напряжение, например T_4 ; ток течет в направлении одной кристаллографической оси, например 1. Тогда при $T_4 \neq 0$; $T_1 \dots T_3$ и T_5 , $T_6 = 0$; $j_1 \neq 0$; $j_2 = j_3 = 0$ получаем

$$\frac{E_1}{\rho_{0,0}} = j_1,$$

т. е. на ток в направлении 1, очевидно, не оказывает влияния сдвиговое напряжение T_4 .

Для $T_4 \neq 0$; $T_1 \dots T_3$ и T_5 , $T_6 = 0$; $j_2 \neq 0$; $j_1 = j_3 = 0$, однако, имеем

$$\frac{E_2}{\rho_{0,0}} = j_2 \text{ и } \frac{E_3}{\rho_{0,0}} = j_2 \pi_{44}^{0,0} T_4.$$

Последний член свидетельствует о том, что сдвиговые напряжения вызывают появление напряженности поля, направленной перпендикулярно к направлению протекания тока; при этом не все направления равнозначны; это можно показать, проведя расчет всех возможных вариантов.

Эффект сжатия.

Действует гидростатическое давление p ; ток течет, например, в направлении 1. Тогда при $T_1 = T_2 = T_3 = -p$; $T_4 = T_5 = T_6 = 0$; $j_1 \neq 0$; $j_2 = j_3 = 0$ имеем

$$\frac{E_1}{\rho_{0,0}} = j_1 [1 - \rho(\pi_{11}^{0,0} + 2\pi_{12}^{0,0} T_1)].$$

В приведенных случаях коэффициенты пьезосопротивления π_{np} называют соответственно продольными, поперечными, сдвиговыми коэффициентами и коэффициентами сжатия. Приведенные примеры показывают, как можно измерить соответствующие коэффициенты. Прикладывая определенное механическое напряжение и зная удельное сопротивление, измеряют силу тока и электрическое напряжение.

Рассмотренные выше случаи ограничиваются декартовой системой координат, ориентированной в направлении

кристаллографических осей. Разумеется, применяемые ППЧЭ можно также вырезать из монокристалла под любым углом. В этом случае также возникают пьезорезистивные эффекты. Математически их расчет проводится преобразованием системы координат, причем новая система координат получается из первоначальной путем вращения и, как и та, снова является ортогональной. Таким образом, получается расчет для общего случая.

Таблица 2.3
Коэффициенты пьезочувствительности

Тип	<i>p</i> -Si		<i>n</i> -Si	
$\rho^{0,0}/\text{Ом}\cdot\text{см}$	7,8		11,7	
Направление	<100>	<110>	<100>	<110>
$\pi_{11}\cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	---	+6,6	---	-102,2
$\pi_{12}\cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	---	-1,1	---	+53,4
$\pi_{44}\cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	---	+138,1	---	-13,6
$\pi_i\cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	0	+72	-102,2	-31
$\pi_i\cdot 10^{-11}, \text{Па}^{-1}$	0	-66	+53,4	-18

Математическое рассмотрение самого общего случая представлено в [64]. Приведем лишь некоторые выводы из такого рассмотрения, имеющие большое практическое значение:

- топологию ППЧЭ можно спроектировать так, чтобы эффект в определенном направлении принял максимально возможное значение;

- можно изготовить ППЧЭ, которые независимо от ориентации пьезорезисторов всегда измеряли бы сумму главных напряжений;

- ППЧЭ можно ориентировать так, чтобы они теоретически обладали исчезающе малой чувствительностью к поперечным или сдвиговым механическим воздействиям. Практически разработанные преобразователи имеют чувствительность к поперечному механическому воздействию порядка 45 дБ, что составляет 1:166 по сравнению с чувствительностью к продольному воздействию.

Именно этот последний случай имеет особое значение в измерительной технике.

Коэффициенты пьезочувствительности, приведенные в табл. 2.3, зависят от ориентации, температуры и уровня легирования. Для кремния n -типа проводимости наибольшую роль играет π_{11} , а для кремния p -типа проводимости – π_{44} (как обладающие наибольшими значениями). Коэффициенты пьезосопротивления связаны с коэффициентом пьезочувствительности с помощью модуля Юнга.

Вклад в изменения сопротивления вносится напряжениями: продольными и поперечными – относительно текущей деформации:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t, \quad (2.9)$$

где σ_l – продольный компонент напряжения, т. е. компонент напряжения, параллельный направлению текущей деформации; σ_t – поперечный компонент напряжения, т. е. компонент напряжения, перпендикулярный направлению текущей деформации; π_l – продольный пьезорезистивный коэффициент; π_t – поперечный пьезорезистивный коэффициент.

Пьезорезистивные коэффициенты π_l и π_t для кремния (100) как функция ориентации кристалла показаны на рис. 2.6 [63].

Для слабо легированного кремния n - или p -типа проводимостей ($N < 10^{18} \text{ см}^{-3}$), температурный коэффициент сопротивления (ТКС) для π_l и π_t приблизительно равен 0,25 %/°C. Он уменьшается пропорционально концентрации до значения 0,1 %/°C для $N \approx 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Максимизацией выражения для сопротивления, вызванного напряжениями в (2.9), можно оптимизировать достижимую чувствительность всего ППЧЭ (см. также п. 2.5).

Ориентация мембраны ППЧЭ датчиков давлений (см. например, рис. 2.1) определяется анизотропией и методами изготовления. Поверхность кремниевой пластины для изготовления ППЧЭ датчиков давлений обычно имеет ориентацию (100), края вытравленной структуры – это

пересечения плоскостей (100) и (111), и таким образом направления $\langle 110 \rangle$. Для ППЧЭ датчиков давлений наиболее широко используются пьезорезисторы p -типа проводимости. Это вызвано тем, что ориентация для максимальной пьезорезистивности ($\langle 110 \rangle$) совпадает с ориентацией стандартной вытравленной мембраны (см. например, рис. 2.1), а также из-за того, что продольный пьезорезистивный коэффициент примерно равен по своему значению, но противоположен по знаку в сравнении с поперечным пьезорезистивным коэффициентом (см. табл. 2.3 и рис. 2.6, а) [66].

Пьезорезисторы, ориентированные под углом 45° относительно базового среза пластины, т. е. в направлении $\langle 100 \rangle$, нечувствительны к прилагаемому напряжению, что обеспечивает недорогой способ создавать независимые от деформации диффузионные чувствительные элементы для измерения температуры и для температурной компенсации мостовой схемы. Используя данные табл. 2.3, можно количественно рассчитать π_l и π_t для любой ориентации.

В общем случае после преобразования координат получаются пьезорезистивные коэффициенты π_l и π_t вида [18]:

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2);$$

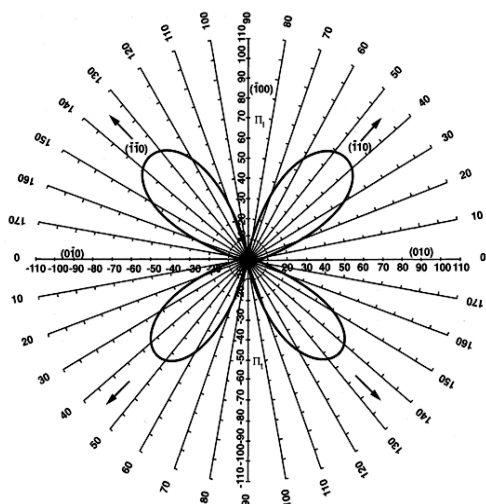
$$\pi_t = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2),$$

где (l_1, m_1, n_1) и (l_2, m_2, n_2) – компоненты направляющих косинусов между направлениями продольных (индекс 1) и поперечных (индекс 2) резисторов. Для направлений $\langle 110 \rangle$ в кремнии ориентации (100) эти компоненты равны

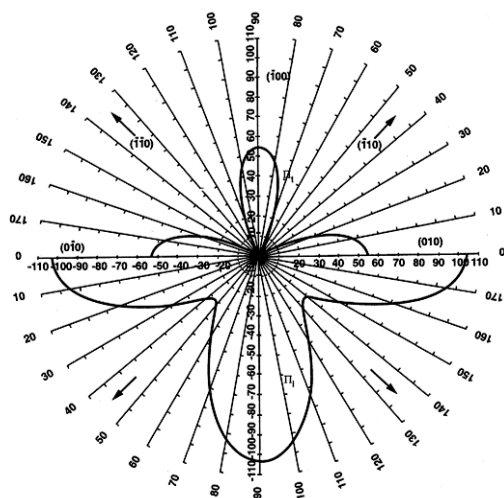
$$(\pm 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0);$$

$$\pi_l = 1/2(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44});$$

$$\pi_t = 1/2(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}).$$



а



б

Рис. 2.6. Пьезорезистивные коэффициенты π_l и π_t для кремния:
 а – для кремния p -типа проводимости в плоскости (001) ($10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$);
 б – для кремния n -типа проводимости в плоскости (001) ($10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$)

Из табл. 2.3 можно увидеть, что для кремния p -типа проводимости π_{44} обладает большим значением, чем другие два коэффициента, поэтому уравнение (2.9) можно записать

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t). \quad (2.10)$$

Для кремния n -типа проводимости π_{44} может быть игнорирован, и мы получим:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12}}{2} (\sigma_l + \sigma_t). \quad (2.11)$$

Уравнения (2.10) и (2.11) действительны только для однородного напряжения или если размеры резисторов малы по сравнению с размерами мембраны.

2.2.1. Пьезорезистивные коэффициенты

В ППЧЭ датчиков давлений пьезорезисторы по характеру распределения в них примесей можно условно подразделить на три класса [7]: равномерно легированные, диффузионные и ионно-имплантированные.

Как уже упоминалось, коэффициенты пьезочувствительности, приведенные в табл. 2.3, иначе называемые главными коэффициентами пьезосопротивления, зависят от ориентации, температуры и уровня легирования. На рис. 2.7 представлены

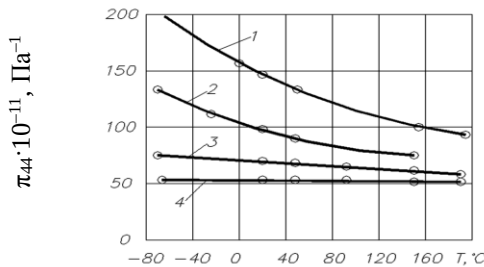
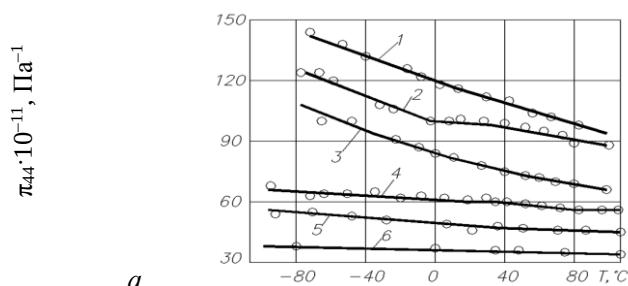


Рис. 2.7. Зависимость главного пьезорезистивного коэффициента π_{44} от температуры и концентрации примесей для равномерно легированного кремния p -типа проводимости
 1 — $N < 10^{17}$; 2 — $N = 5 \cdot 10^{18}$; 3 — $N = 3 \cdot 10^{19}$; 4 — $N = 10^{20}$

температурно-концентрационные зависимости коэффициента π_{44} для равномерно легированного кремния p -типа проводимости [6].

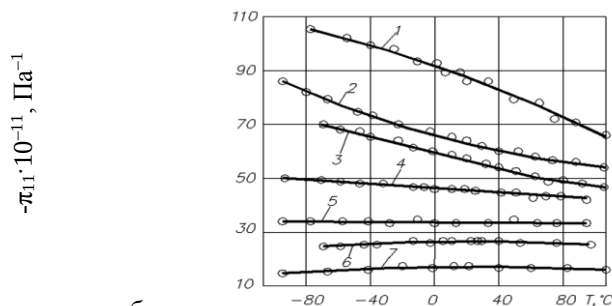
С учетом (2.10) и (2.11) для высокого уровня легирования истинные значения π_{44} будут несколько больше, чем значения π_{44} , приведенные на рисунке.

В диффузионных слоях пьезорезистивные коэффициенты определяются концентрацией примесей на поверхности образца и практически не зависят от закона распределения примесей. На рис. 2.8 приведены зависимости главных пьезорезистивных коэффициентов π_{11} для n -типа проводимости и π_{44} для p -типа проводимости для кремниевых диффузионных слоев от поверхностной концентрации и температуры [71].



a

1 – $N = 3 \cdot 10^{18}$; 2 – $N = 9 \cdot 10^{18}$; 3 – $N = 5 \cdot 10^{19}$; 4 – $N = 3 \cdot 10^{20}$;
5 – $N = 5 \cdot 10^{20}$; 6 – $N = 2 \cdot 10^{21}$



б

1 – $N = 1,8 \cdot 10^{18}$; 2 – $N = 8,8 \cdot 10^{18}$; 3 – $N = 5,2 \cdot 10^{19}$; 4 – $N = 9 \cdot 10^{19}$; 5 – $N = 2,1 \cdot 10^{20}$; 6 – $N = 3,2 \cdot 10^{20}$; 6 – $N = 1 \cdot 10^{21}$

Рис. 2.8. Зависимость от температуры и поверхностной концентрации примесей главных пьезорезистивных коэффициентов:

a – диффузионные слои кремния p -типа проводимости;

б – диффузионные слои кремния n -типа проводимости

С учетом этих зависимостей, а также с учетом (2.10) и (2.11), можно рассчитать чувствительность диффузионных пьезорезисторов и температурную зависимость чувствительности для различных значений поверхностной концентрации примесей. Так же, как и для равномерно легированных слоев, допущения (2.10) и (2.11) справедливы лишь для слабого уровня легирования. По мере увеличения концентрации примесей необходимость учета главных пьезорезистивных коэффициентов (π_{11} и π_{12} для p -типа проводимости и π_{44} для n -типа проводимости) возрастает.

Для примера рассмотрим зависимость коэффициента π_{44} для диффузионного слоя n -типа проводимости от поверхностной концентрации примесей для высокой степени легирования при фиксированной температуре (рис. 2.9) [70].

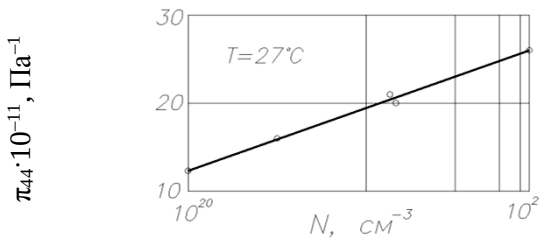


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента π_{44} от поверхностной концентрации примесей для диффузионных слоев кремния n -типа проводимости

Как видно, по мере возрастания поверхностной концентрации примесей значение коэффициента π_{44} становится не только соизмеримым, но и больше соответствующих значений коэффициента π_{11} для тех же условий.

Концентрационная зависимость коэффициента π_{44} от температуры для кремния p -типа проводимости по данным [10] приведена на рис. 2.10.

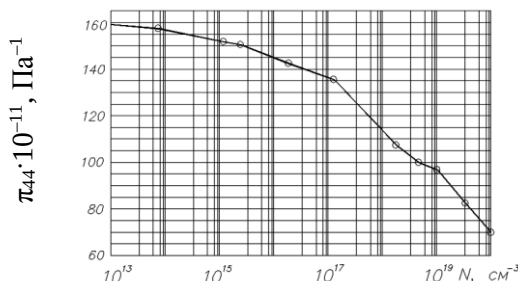


Рис. 2.10. Зависимость коэффициента π_{44} для кремния p -типа проводимости от концентрации дырок при $T = 300$ К

Для ионно-имплантированных пьезорезисторов в литературе отсутствуют в достаточном объеме сведения относительно зависимости главных пьезорезистивных коэффициентов от концентрации, температуры и характера распределения примесей.

2.2.2. Температурные и концентрационные зависимости сопротивления пьезорезистивных слоев

Аналитическое описание температурных и концентрационных зависимостей удельного сопротивления и электропроводности кремния имеет большое практическое значение при проектировании элементов микросистемной техники. Экспериментально электропроводность кремния исследовалась на протяжении нескольких десятилетий, в результате чего удалось с достаточной точностью описать концентрационную зависимость электропроводности при $T = 300$ °С.

Менее исследован вопрос об аналитическом описании температурной зависимости электропроводности для различных концентраций примеси. В этом направлении имеется ряд работ [37, 59], из которых необходимо отметить, где обоснована возможность представления температурной зависимости подвижности в виде

$$\mu = A(T) - B(T) \ln N,$$

где $A(T)$ и $B(T)$ – некоторые температурные функции.

Во всех работах расчет температурной зависимости подвижности производится с помощью классической теории, учитывающей рассеяние электронов и дырок на колебаниях кристаллической решетки и ионизированных атомах примеси. Однако данные, полученные теоретически, лишь качественно совпадают с экспериментальными данными, особенно в области концентраций $N > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, представляющей особый интерес для пьезорезистивных сенсоров.

С другой стороны, теоретические расчеты концентрации свободных носителей затруднены из-за изменения энергии ионизации примеси в зависимости от уровня легирования и некоторой перестройки энергетического спектра вблизи края валентной зоны или зоны проводимости.

Перечисленные причины привели к тому, что на практике широко применяются полуэмпирические зависимости, основанные на экспериментальных результатах. В данной работе приводится лишь линейное по температуре описание, которого достаточно для многих практических оценок. Основываясь на экспериментальных данных, концентрационную зависимость удельного сопротивления кремния при температуре 23 °С можно аппроксимировать зависимостями [54]:

– *кремний p-типа проводимости, легированный бором:*

$$\rho = \frac{1,305 \cdot 10^{16}}{N_B} + \frac{1,133 \cdot 10^{17}}{N_B \left[1 + \left(2,58 \cdot 10^{-19} N_B \right)^{-0,737} \right]}, \quad (2.12)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·см;
 N_B – концентрация атомов бора, см^{-3} ;

– *кремний n-типа проводимости, легированный фосфором:*

$$\rho = \frac{6,242 \cdot 10^{18} \cdot 10^Z}{N_P}, \quad (2.13)$$

где

$$Z = \frac{C_0 + C_1 y + C_2 y^2 + C_3 y^3}{1 + D_1 y + D_2 y^2 + D_3 y^3}. \quad (2.14)$$

В выражении (2.14) $y = \lg N_p - 16$; $C_0 = -3,0769$; $C_1 = 2,2108$; $C_2 = -0,62272$; $C_3 = 0,057501$; $D_1 = -0,68157$; $D_2 = 0,19833$; $D_3 = -0,018376$; N_p – концентрация атомов фосфора, см^{-3} .

Графически (2.12), (2.13) выражаются зависимостями, приведенными на рис. 2.11 (так называемые «кривые Ирвина»).

На рис. 2.12 приведены концентрационные зависимости температурного коэффициента сопротивления кремния n - и p -типа проводимостей [55].

Здесь по оси абсцисс указано удельное сопротивление. Для перерасчета в более привычную объемную концентрацию легирующей примеси можно воспользоваться соотношениями (2.12) – (2.14).

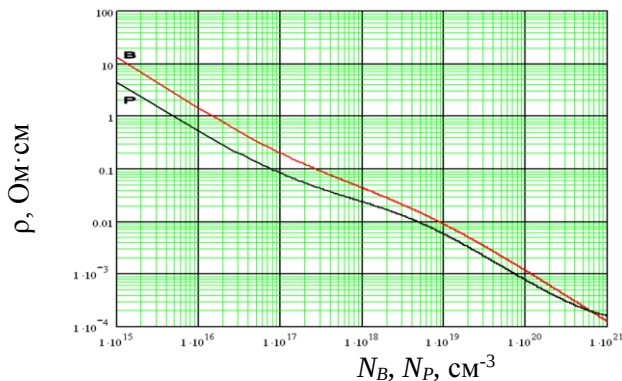


Рис. 2.11. Кривые Ирвина

В обращенном уравнении относительно концентрации атомов бора N_B или фосфора N_p (2.12) и (2.13) принимают вид

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T_0}, \quad N_B = \frac{1,33 \cdot 10^{16}}{\rho} + \frac{1,082 \cdot 10^{17}}{\rho \left[1 + (54,54\rho)^{1,105} \right]};$$

$$N_P = 6,242 \cdot 10^{18+Z} / \rho,$$

$$\text{где } Z = \frac{A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3}{1 + B_1 x + B_2 x^2 + B_3 x^3}, \quad x = \lg \rho; \quad A_0 = -3,1083; \quad A_1 = -3,2626;$$

$A_2 = -1,2196$; $A_3 = -0,13923$; $B_1 = 1,0265$; $B_2 = 0,38755$; $B_3 = 0,041833$.

В линейном приближении с учетом (2.12) – (2.14) температурное изменение удельного сопротивления может быть описано выражением

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - 23)], \quad (2.15)$$

где T – температура, °C; $\rho(T)$ – удельное сопротивление при $T = 23$ °C. Температурный интервал, в котором справедливо выражение (2.15), невелик и составляет около 20 °C. Для больших интервалов становится заметен вклад членов ряда, нелинейных по температуре.

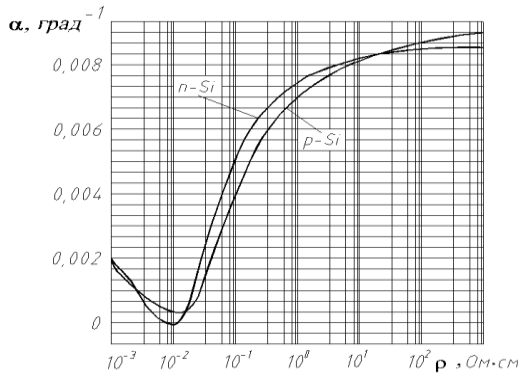


Рис. 2.12. Концентрационные зависимости температурного коэффициента сопротивления кремния n - и p -типа проводимостей

2.3. Мост Уитстона

Чтобы получить выходной электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению, изменяющемуся под воздействием давления, через это сопротивление должен быть пропущен электрический ток или к нему должно быть подведено электрическое напряжение.

Если, например, запитывать сопротивление постоянным током, при изменении сопротивления будет изменяться падение напряжения на нем. Это изменение происходит относительно некоторой начальной постоянной величины.

Поскольку механической величине соответствует только изменение электрического напряжения, его начальное постоянное значение должно быть сведено к нулю. Это достигается путем компенсации, например, с помощью, так называемой мостовой схемы (рис. 2.13).

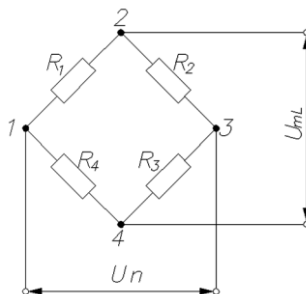


Рис. 2.13. Мостовая измерительная схема

Подобные мостовые схемы могут быть в принципе запитаны как постоянным, так и переменным напряжением.

При изменяющемся реактансе возможно питание только переменным напряжением, при изменении омического сопротивления могут быть применены оба вида питания.

У мостов переменного напряжения для компенсации начальной постоянной величины должна быть проведена балансировка по модулю и по фазе, в результате чего возрастают затраты на подготовку измерения.

Однако сравнительно легко можно создать усилители переменного напряжения с высоким коэффициентом усиления и с достаточной стабильностью, хотя при этом возникают трудности, связанные с необходимостью синфазного выпрямления.

Мосты постоянного напряжения не требуют фазовой балансировки и последующего выпрямления, что уменьшает затраты и повышает точность. При питании постоянным напряжением, кроме того, значительно проще получить высокостабильное и обладающее малым уровнем пульсаций питающее напряжение, чем при питании несущей частотой. Эти преимущества способствуют все более широкому применению мостов постоянного напряжения, и в первую очередь при использовании полупроводниковых пьезорезисторов, которые во многих случаях позволяют проводить измерения без усиления [50].

Устройство, приведенное на рис. 2.13 и состоящее из четырех сопротивлений, принято называть мостовой схемой Уитстона. К контактам 1 и 3 моста подключается напряжение питания U_n , на контактах 2 и 4, если мост не сбалансирован, т. е. находится в состоянии равновесия, появляется напряжение U_{mL} . Между этими двумя напряжениями существует следующая зависимость:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (2.16)$$

При $z_1 = R_1/(R_1 + R_2)$ и $z_4 = R_4/(R_3 + R_4)$

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = z_1 - z_4.$$

Сопротивление моста можно представить себе состоящим из постоянной и переменной составляющих, т. е.

$$R_v = R_{v0} + \Delta R_v = R_{v0} \left(1 + \frac{\Delta R_v}{R_{v0}} \right) = R_{v0} (1 + r_v),$$

где $\Delta R_v / R_{v0} = r_v$; v – текущий индекс.

Если все сопротивления моста равны, мост при $\Delta R_v = 0$ уравновешен, а в этом случае при рассогласовании моста имеет место соотношение

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + r_1}{1 + \frac{1}{2} r_1 + \frac{1}{2} r_2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + r_4}{1 + \frac{1}{2} r_3 + \frac{1}{2} r_4}.$$

Для малых значений r_v в первом приближении можно записать

$$\frac{U_{mL}}{U_n} \approx \frac{1}{4} [r_1 - r_2 + r_3 - r_4] = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_{10}} - \frac{\Delta R_2}{R_{20}} + \frac{\Delta R_3}{R_{30}} - \frac{\Delta R_4}{R_{40}} \right]. \quad (2.17)$$

Отсюда следует, что выходное напряжение моста U_{mL} пропорционально напряжению питания U_n и алгебраической

сумме относительных изменений сопротивлений. Коэффициент пропорциональности равен $\frac{1}{4}$. При достаточно больших относительных изменениях сопротивлений отношение U_{mL}/U_n моста нелинейно, т. е. выходное напряжение зависит не только от значений в первой степени, но и от r_v с более высокими степенями.

Преимущество мостовых устройств можно пояснить на ряде специальных примеров.

Мост с одним активным плечом $r_1 \neq 0, r_2 = r_3 = r_4 = 0$ (четвертьмост).

В этом случае

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} \left[\frac{1+r_1}{1+r_1/2} - 1 \right] = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_1}{1+r_1/2}. \quad (2.18)$$

После разложения в степенной ряд и ограничения этого ряда квадратичным или линейным членом получим следующее выражение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} \approx \frac{1}{4} r_1 \left[1 - \frac{1}{2} r_1 \right] \approx \frac{1}{4} r_1 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_{10}}. \quad (2.19)$$

При достаточно большом разбалансе у четвертьмоста наблюдается нелинейность отношения U_{mL}/U_n .

Мост с двумя активными, одинаково изменяющимися плечами (чистый полумост).

Полумост характеризуется тем, что $r_1 = -r_2, r_3 = r_4 = 0$. Для него действительно условие

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2} r_1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_{10}}. \quad (2.20)$$

Выходное напряжение такого моста при одинаковых r_v в два раза выше, чем у четвертьмоста; чистый полумост не обнаруживает нелинейности.

Мост с четырьмя активными, одинаково изменяющимися плечами (чистый полный мост).

Полный мост характеризуется тем, что $r_1 = r_3 = -r_2 = -r_4$. Для него справедливо следующее отношение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = r_1 = \frac{\Delta R_1}{R_{10}}. \quad (2.21)$$

Выходное напряжение этого моста при равных r_v в четыре раза больше, чем у четвертьмоста, к тому же отсутствует нелинейность моста.

Связь с тензометрией получается более очевидной, если ввести простейшую (линейную) зависимость между сопротивлением пьезорезистора R_v и продольной деформацией ε :

$$R = R_{v0}(1 + K\varepsilon_v),$$

или

$$\frac{\Delta R_v}{R_{v0}} = K\varepsilon_v.$$

При этом для простоты вначале предполагается, что коэффициенты K всех пьезорезисторов одинаковы. Из уравнений (2.17)–(2.21) следует, что изменения каждого из сопротивлений моста должны иметь определенную направленность с тем, чтобы не было взаимной компенсации измерительного сигнала.

На рис. 2.14 показан тензометрический мост с четырьмя активными плечами, включенными так, что все четыре пьезорезистора вызывают положительное приращение выходного напряжения.

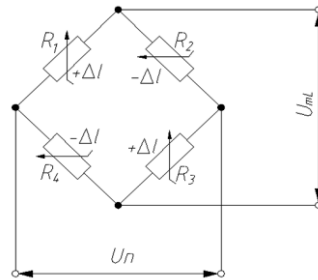


Рис. 2.14. Тензометрический мост с четырьмя активными плечами

Как следует из вышеизложенного, для полного тензометрического моста действительно выражение:

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{K}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4], \quad (2.22)$$

откуда при $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$ имеем

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = K\varepsilon. \quad (2.23)$$

Для чистого полумоста действительно выражение

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{K}{2}\varepsilon, \quad (2.24)$$

а для четвертьмоста – выражение

$$\frac{U_{mL}}{U_n} \approx \frac{K}{4}\varepsilon. \quad (2.25)$$

В случае четвертьмоста второе приближение с учетом квадратического члена ε нельзя получить из уравнения (2.25). У полупроводниковых пьезорезисторов нелинейность настолько велика, что она должна быть учтена наряду с нелинейностью моста; в совокупности нелинейность в целом уменьшается. Без учета нелинейности пьезорезистора погрешность от нелинейности в случае четвертьмоста согласно (2.25), равна $K\varepsilon/2$; для $K = 120$ и $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ она составляет 3 %.

Уравнения (2.22)–(2.25) в общем виде можно представить как

$$U_{mL} = U_n B'_\varepsilon \varepsilon, \quad (2.26)$$

где B'_ε – отнесенный к величине напряжения питания моста коэффициент относительной пьезочувствительности моста.

Для двух попарно изменяемых резисторов в структуре полного моста, на которые воздействует двухосное напряженное поле (σ_l, σ_t) с учетом (2.9), (2.10), (2.11) выходное напряжение

$$\frac{U_{mL}}{U_n} = \frac{1}{2}(\pi_l - \pi_t)(\sigma_l - \sigma_t). \quad (2.27)$$

Наряду с мостами постоянного напряжения применяются также мосты постоянного тока, техника подключения которых несколько сложнее, и в рамках данной работы останавливаться на ней подробно представляется нецелесообразно. Тем не менее необходимо сказать об особенностях питания постоянным током. Питание постоянным током при длинных соединительных линиях обладает тем преимуществом, что исключается влияние изменения сопротивления этих линий (например, вследствие изменения температуры). Кроме того, питание током в случае полупроводниковых пьезорезисторов нередко используется потому, что благодаря этому достигается более благоприятная температурная зависимость коэффициента относительной пьезочувствительности моста (самокомпенсация моста) (см. также п. 2.5) [18].

2.4. Топология полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений

Топология – это зафиксированное на материальном носителе пространственно-геометрическое расположение совокупности элементов и связей между ними.

Во многих работах, посвященных вопросам проектирования ППЧЭ датчиков давлений поднимается вопрос о выборе оптимальной топологии ППЧЭ [8, 14, 17]. Оптимизация проводится, как правило, лишь по единственному критерию – максимальной чувствительности элемента. На практике таких критериев может быть значительно больше. В ППЧЭ, как и в любом микроэлектронном изделии, топология схемы выбирается в зависимости от физических, технологических, схематических, метрологических и конструктивных требований. При этом вариант топологии ППЧЭ, обеспечивающий максимальную чувствительность преобразователя, может оказаться далеко не оптимальным и даже непригодным с технологической, либо конструктивной точки зрения. Поэтому в двух следующих подразделах будут подробно рассмотрены два основных топологических варианта ППЧЭ, нашедших наиболее широкое применение при построении датчиков давлений, а перед этим

остановимся на общих принципах проектирования топологии ППЧЭ на примере круглой и квадратной мембран.

Пусть на жестко закрепленную по контуру мембрану радиусом a и толщиной h действует давление P (рисунок 2.15).

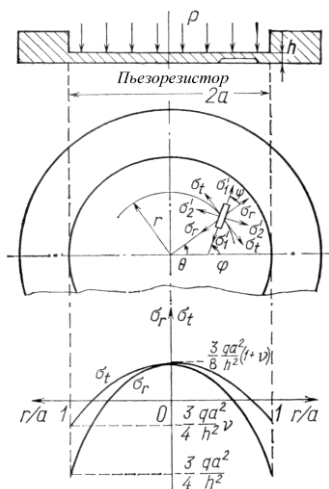


Рис. 2.15. Схема расположения пьезорезистора на мембране [7].

Пьезорезистор расположен на расстоянии r от центра мембраны на ее обратной по отношению к приложенному избыточному давлению стороне. Радиальное σ_r и тангенциальное σ_t напряжения в этой точке можно рассчитать по формулам [6]:

$$\sigma_r = \frac{3q}{8h^2} \left[a^2 (1 + \nu) - r^2 (3 + \nu) \right];$$

$$\sigma_t = \frac{3q}{8h^2} \left[a^2 (1 + \nu) - r^2 (1 + 3\nu) \right].$$

Если материал мембраны изотропен, то радиальное и тангенциальное напряжения на поверхности мембраны не зависят от угла θ (см. рис. 2.15). В этом случае напряжения определяются только расстоянием r от центра мембраны, как

показано на рис. 2.15. Линейная зависимость между приложенным давлением P и механическим напряжением справедлива лишь для малых прогибов мембраны (меньших ее толщины h), в которых, как предполагается, отсутствуют напряжения в нейтральной плоскости мембраны.

Учет анизотропии механических свойств кремниевых упругих элементов теоретически может быть произведен с различной степенью приближения к эксперименту [2, 23]. Однако возрастающая при этом сложность решения иногда может оказаться неоправданной. В ряде случаев учет анизотропии приведет к такому отличию от изотропного случая, которое практически проверить весьма сложно из-за значительного технологического разброса характеристик ППЧЭ.

В общем случае, при учете анизотропии упругих свойств кремния радиальное $\sigma_r(r, \theta)$ и тангенциальное $\sigma_t(r, \theta)$ напряжения будут являться функциями не только радиуса, но и угла на мембране. Как известно, компоненты тензора механических напряжений в системе координат, связанной с пьезорезистором (см. рис. 2.15), можно выразить через радиальное и тангенциальное напряжения следующим образом [7]:

$$\sigma'_1 = \sigma_r \cos^2 \psi + \sigma_t \sin^2 \psi;$$

$$\sigma'_2 = \sigma_r \sin^2 \psi + \sigma_t \cos^2 \psi;$$

$$\sigma'_6 = (\sigma_t - \sigma_r) \sin \psi \cos \psi,$$

где ψ – угол поворота продольной оси пьезорезистора относительно радиус-вектора в точку расположения пьезорезистора. Как видно из рис. 2.15, углы θ , φ и ψ связаны следующим образом:

$$\varphi = \theta + \psi.$$

Таким образом, в системе координат, связанной с плоскостью упругого элемента, угол θ характеризует анизотропию упругих свойств кремния, а угол φ – анизотропию пьезорезистивных свойств через анизотропию пьезорезистивных коэффициентов.

В практических разработках ППЧЭ чаще всего встречается радиально-тангенциальное расположение пьезорезисторов. В этом случае для радиальных резисторов (когда $\psi = 0^\circ$):

$$\varphi = \theta, \sigma'_1 = \sigma_r, \sigma'_2 = \sigma_t, \sigma'_6 = 0,$$

а для тангенциальных (когда $\psi = 90^\circ$):

$$\varphi = \theta + 90^\circ, \sigma'_1 = \sigma_t, \sigma'_2 = \sigma_r, \sigma'_6 = 0.$$

Для определения топологии пьезорезисторов на квадратной, заземленной по контуру пластинке (мембране) размером $A \times A$ и одинаковой толщины c_p , необходимо найти зависимость ее деформации от равномерно распределенного по ее площади разностного давления Δp . Заземленная по контуру квадратная мембрана в системе координат x, y, z показана на рис. 2.16, где нанесены также местные радиусы кривизны R_1 и R_2 деформированной пластины [33, 34].

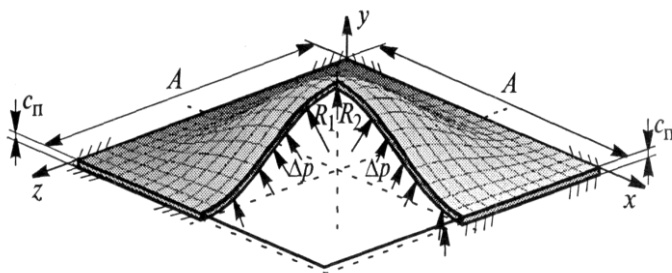


Рис. 2.16. Деформация квадратной мембраны, нагруженной давлением

Если частота изменения интенсивности внешней нагрузки значительно меньше частоты собственных колебаний основного (низшего) тона, уравнение, описывающее прогибы мембраны $\omega(x, z)$ в направлении оси y , имеет вид [33, 45]:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial z^4} + \frac{q}{D} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \frac{1}{D} F(x, z, t), \quad (2.28)$$

где $\omega(x, z, t)$ – отклонение точки на плоскости мембраны от положения равновесия; q – масса мембраны, отнесенная к

единице ее поверхности; $F(x, z, t)$ – интенсивность внешней нагрузки; $D = \frac{Ec_{\pi}^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость мембраны.

Так как мембрана имеет жесткую заделку по контуру, выполняются граничные условия:

$$\begin{aligned} \omega = 0, \frac{d\omega}{dx} = 0 \quad \text{для } x = 0 \text{ или } x = A; \\ \omega = 0, \frac{d\omega}{dz} = 0 \quad \text{для } z = 0 \text{ или } z = B. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Решение уравнения (2.28) для граничных условий (2.29) имеет вид

$$\omega(x, z) = \frac{\Delta p A^4}{32\pi^4 D} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{A} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{A} \right). \quad (2.30)$$

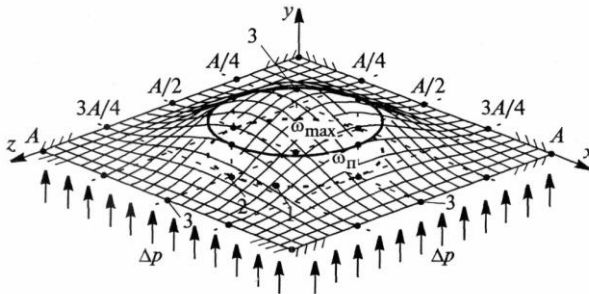


Рис. 2.17. Деформация срединной плоскости, защемленной по контуру мембраны:

- 1 – геометрическое место точек с нулевой относительной деформацией;
- 2 – координатная точка, соответствующая нулевой относительной деформации;
- 3 – точки с максимальной относительной деформацией

Очевидно, что максимальное перемещение соответствует центру мембраны с координатами $x = A/2, z = A/2$; тогда $\omega_{\max} = (\Delta p A^4)/8\pi^4 D$.

Определим жесткость мембраны в направлении оси y

$$G_y = \frac{\Delta p S}{\omega_{\max}} = \frac{\Delta p A^2}{\omega_{\max}} = \frac{8\pi^4 D}{A^2}, S = A^2. \quad (2.31)$$

Запишем далее относительные удлинения мембраны в направлении осей x и z

$$l_x = y / R_1, \quad l_z = y / R_2, \quad (2.32)$$

где R_1, R_2 – радиусы кривизны в плоскостях xu и zu (рис. 2.17) [33].

Имеют место известные соотношения [7]:

$$\begin{aligned} e_x &= -y \frac{\Delta p S}{8\pi^2 D} \cos \frac{2\pi x}{A} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{A} \right); \\ e_z &= -y \frac{\Delta p S}{8\pi^2 D} \cos \frac{2\pi z}{A} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{A} \right). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Выражения (2.33) позволяют определить топологию резисторов на мембране. Если, например, плоскость их расположения определяется координатой $y = -c_{\Pi}/2$, то в точках с координатами $x = 0, z = A/2$; $x = A, z = A/2$; $x = A/2, z = 0$; $x = A/2, z = A$ имеют место максимальные деформации, определяемые формулой:

$$e_{\max} = \frac{\Delta p c_{\Pi} S}{8\pi^2 D}. \quad (2.34)$$

Очевидно, в точке с координатами $x = A/2, z = A/2$ деформация также определяется формулой (2.34), но со знаком «минус». В точках с координатами: $x = A/4, z = A/2$ и $x = A/2, z = A/4$, а также $x = 3A/4, z = A/2$ и $x = A/2, z = 3A/4$ деформации нулевые, и в этих местах следует располагать резисторы для температурных компенсаций (терморезисторы), а в местах максимальных деформаций – пьезорезисторы, включаемые в мостовые схемы. Точки с нулевой относительной деформацией соответствуют точкам перегиба линий, получаемых в результате сечений деформированной срединной плоскости мембраны плоскостями, проходящими через точку с координатами: $x = A/2, z = A/2$ и перпендикулярными к плоскости xz (см. рис. 2.17).

Подставив любую из координат точек с нулевой относительной деформацией в выражение (2.30), получим перемещение точек перегиба:

$$\omega_{\Pi} = \frac{\Delta p A^4}{16\pi^4 D}.$$

В работе [5] приведена формула для частоты собственных колебаний (основной тон) квадратной, защемленной по контуру мембраны:

$$f_{\Pi} = \frac{35,6}{A^2} \sqrt{\frac{D}{\rho c_{\Pi}}}.$$

При этом собственные частоты колебаний настолько велики, что принятое допущение о возможности рассмотрения статического режима работы мембраны для решения задачи об ее деформации вполне оправдано.

Можно показать, что мембрана с жестким недеформируемым центром размером $a \times a$ имеет максимальное перемещение, равное

$$\omega_{\max} = \Delta p \frac{(A-a)^4}{8\pi^4 D},$$

а жесткость в направлении оси y определяется формулой

$$G_y = \frac{8\pi^4 A^2 D}{(A-a)^4}.$$

Отметим, что места максимальных напряжений мембраны располагаются по внешнему контуру ее защемления и по контуру ее границы с жестким центром.

Частота собственных колебаний мембраны с жестким центром определяется формулой

$$\omega = \sqrt{\frac{G_y}{(m_{\text{ц}} + m_{\Pi})}},$$

где G_y – жесткость мембраны, вычисляемая по формуле (2.31); $m_{\text{ц}}$, m_{Π} – масса жесткого центра и упругой перемычки соответственно.

Очевидно, при установке дополнительных масс на жестком центре их значения добавляются к значению массы жесткого центра.

2.4.1. Пьезорезисторы *p*-типа проводимости на плоскости (100)

Мост Уитстона (см. рис. 2.13) может быть реализован для пьезорезисторов *p*-типа проводимости их размещением в средней части по краям квадратной мембраны в местах наибольших поверхностных механических напряжений (рис. 2.18) [60].

Два резистора ориентированы так, что они чувствительны к напряжению в направлении текущей деформации, а два других – к напряжению, перпендикулярному к направлению текущей деформации, т. е. два продольно напряженных пьезорезистора (*A*) размещены напротив двух поперечно напряженных пьезорезисторов (*B*), значение сопротивления двух из них увеличивается, а двух других – уменьшается под приложенным напряжением. В этом случае из (2.10):

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 70 \cdot 10^{-11} (\sigma_l - \sigma_t). \quad (2.35)$$

Для практических напряжений ($\sigma_l = 10$ МПа; $\sigma_t = 50$ МПа) из (2.35) [52]:

$$\Delta R/R \sim 2,8 \, \%.$$

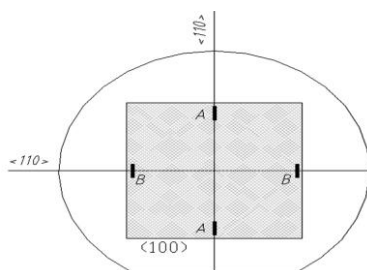


Рис. 2.18. Реализация пьезорезистивного эффекта для пьезорезисторов *p*-типа проводимости:

A – пьезорезисторы, испытывающие продольную нагрузку;

B – пьезорезисторы, испытывающие поперечную нагрузку

Изменяя диаметр и толщину кремниевой мембраны, возможно формирование ППЧЭ датчиков давлений на диапазоны от 0 до 200 МПа с чувствительностью к давлению от 10 мВ/кПа для датчиков низких давлений до 0,001 мВ/кПа для датчиков высоких давлений. ППЧЭ на рис. 2.1 является наглядным изображением технической реализации, представленной на рис. 2.18.

Чувствительность ППЧЭ на рис. 2.18 равна [7]:

$$S = 0,302\pi_{44}a^2 / h^2,$$

где a – половина стороны квадрата (заштрихованная область) (радиус в случае ППЧЭ с круглой мембраной); h – толщина мембраны.

Данный вариант, когда пьезорезисторы p -типа проводимости размещены на мембране (100), представляет собой наиболее распространенный вариант их топологического размещения, несмотря на то что он позволяет реализовывать наименьшее из всех случаев количество топологических вариантов расположения мостовых пьезорезисторных схем. Всего можно предложить два основных топологических варианта ППЧЭ (рис. 2.19) [7].

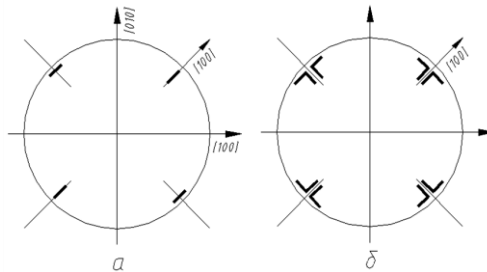


Рис. 2.19. Варианты топологии полных мостовых измерительных схем с пьезорезисторами p -типа проводимости на мембране (100):

а – распределенная по периферии мостовая схема; б – одна или несколько сосредоточенных в определенной области мембраны полных мостовых схем

Все известные варианты топологии ППЧЭ с пьезорезисторами p -типа проводимости на плоскости (100)

представляют собой, по существу, эти два варианта; в том числе и вариант, изображенный на рис. 2.18, несмотря на некоторые непринципиальные отличия. Топологические варианты различаются:

- структурой пьезорезисторов, например, вместо однополосковой структуры пьезорезистора используется меандр (см. рис. 2.1);
- взаимным расположением контактных площадок к пьезорезисторам;
- способом и топологией соединений пьезорезисторов в мостовую схему;
- количеством и взаимным расположением контактных площадок на кристалле.

2.4.2. Пьезорезисторы *n*-типа проводимости на плоскости (100)

Из рис. 2.6 видно, что поперечно напряженный пьезорезистор не может быть уравновешен в отношении продольно напряженного пьезорезистора. Данный недостаток устраняется соосным продольным распределением напряжений в прямоугольной мембране, представленной на рис. 2.20 [60].

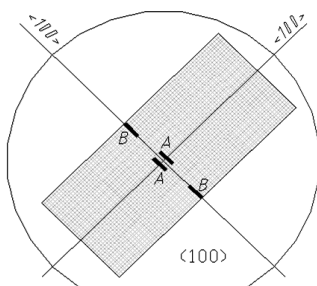


Рис. 2.20. Пьезорезисторы *n*-типа проводимости на плоскости (100)

Для такого ППЧЭ [60]

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 53 \cdot 10^{-11} \sigma_t - 102 \cdot 10^{-11} \sigma_l. \quad (2.36)$$

Для практических напряжений ($\sigma_l = 50$ МПа; $\sigma_t = 10$ МПа) из (2.36) [52]

$$\Delta R/R \sim -4,6 \, \%.$$

В примере ППЧЭ, представленном на рис. 2.20, важно минимизировать поперечное напряжение, создавая абсолютно соосный элемент, т. к. продольные и поперечные компоненты напряжения имеют противоположное влияние и могут уравновесить друг друга. На практике ППЧЭ с предполагаемым увеличением чувствительности на 64 % может быть построен по традиционной топологии в случае 80 % соосности [60].

На основе пьезорезисторов n -типа проводимости на плоскости (100) возможно построение нескольких топологических вариантов полных мостовых схем на поверхности мембраны. Основные из них показаны на рис. 2.21.

Под каждым вариантом дана относительная чувствительность соответствующей мостовой схемы. Чувствительность ППЧЭ на рис. 2.21, принятая за единицу, равна [7]:

$$S = 0,453\pi_{11}a^2/h^2. \quad (2.37)$$

Все варианты по чувствительности подразделяются на две категории: чувствительность имеет значение, близкое к определяемому выражением (2.37), и чувствительность примерно в два раза меньше. Уменьшение чувствительности часто можно компенсировать конструктивно-технологическим путем, например уменьшением толщины мембраны. Поэтому менее чувствительные топологические варианты также могут заслуживать внимания. Например, последний вариант на рис. 2.21 представляет интерес только тангенциальным расположением пьезорезисторов. Это позволяет получить несколько больший диапазон линейного преобразования, лучший отвод тепла от пьезорезисторов на мембране и более рациональную топологию межсоединений пьезорезисторов.

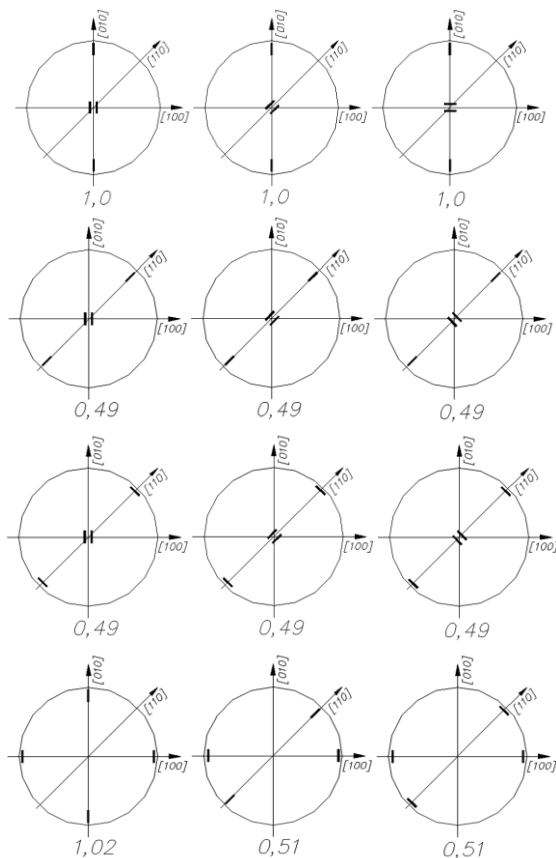


Рис. 2.21. Варианты топологии полных мостовых пьезорезисторных схем n -типа проводимости на мембране (100)

Вывод функций преобразования для конструкций, представленных на рис. 2.18 и 2.20 приведен в п. 2.6.

2.4.3. Выбор и расчет конструкций полупроводниковых пьезорезисторов

Необходимое сопротивление пьезорезисторов может определяться на стадии изготовления как технологически, так и конструкционно. В последнем случае, изменяя форму

пьезорезистора и учитывая известные параметры технологических методов изготовления, можно рассчитать его сопротивление с заданной точностью.

Перед рассмотрением и анализом возможных вариантов конструкций пьезорезисторов необходимо остановиться на таком понятии, как удельное поверхностное сопротивление, связывающее расчетные значения номиналов с технологическими методами изготовления пьезорезисторов на различных этапах.

Физический смысл удельного поверхностного сопротивления (ρ_s) таков, что сопротивление между двумя противоположными гранями квадратного проводника остается одинаковым вне зависимости от размеров квадрата. Это происходит вследствие того, что распределение основных носителей заряда от поверхности вглубь полупроводникового материала подчиняется экспоненциальному закону, и плотность носителей (электронов или дырок) на поверхности составляет максимальное значение. Соответственно сопротивление тем меньше, чем ближе к поверхности полупроводника, и максимальная плотность тока наблюдается на расстоянии от поверхности, стремящемся к нулю. Таким образом, с точки зрения проектирования топологии пьезорезистора не важно, какова будет его высота, важны лишь два размера – длина и ширина, выраженные в количестве квадратов, которые могут быть расположены на площади пьезорезистора. Соответственно удельное поверхностное сопротивление имеет единицу измерения [Ом/мм²] (Ом на квадрат).

В общем случае любая из возможных конструкций пьезорезистора имеет сходство с одной из двух, представленных на рис. 2.22 [4, 28, 39].

Для прямолинейной конфигурации, показанной на рис. 2.22, a , количество квадратов:

$$n = \frac{l_l}{W_l} = \frac{A_R}{W_l^2}, \quad (2.38)$$

где A_R – площадь пьезорезистора, определяемая как

$$A_R = W_l l_l. \quad (2.39)$$

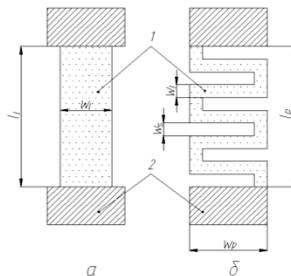


Рис. 2.22. Конфигурации пьезорезисторов:
1 – участок пьезорезистора; 2 – участок проводника

Для конфигурации типа «меандр» (рис. 2.22, б), количество квадратов выражается приблизительно числом прямых линий длиной W_p , умноженных на число квадратов в каждой линии, или

$$n \approx \frac{l_p}{W_l + W_s} \frac{W_p}{W_l} = \frac{A'_R}{W_l^2 (1 + W_s / W_l)}, \quad (2.40)$$

где $A'_R = W_p l_p$ – площадь пьезорезистора.

Более точный способ определения числа квадратов дан ниже.

Фактически уравнение (2.40) можно использовать в обоих случаях, так как оно переходит в уравнение (2.39) при $W_s = 0$. Из уравнения (2.40) видно, что приближенная величина минимальной ширины линии пьезорезистора определяется требуемым числом квадратов и минимальной площадью пьезорезистора (зависящей от требований по мощности). Отношение ширины промежутка между линиями к ширине линии (W_s/W_l) оказывает влияние на результаты расчета, но обычно $W_s/W_l \approx 1$ и влияние мало. На рис. 2.23 приведены результаты расчета по уравнению (2.40) для случая $W_s/W_l = 1$.

Видно, что для получения низкоомных мощных пьезорезисторов необходимы широкие линии, тогда как маломощные высокоомные пьезорезисторы могут быть получены и при очень узких линиях. В действительности минимальная толщина линии (определяемая на основании

требований по мощности) может быть настолько мала, что ее будет невозможно получить технологически.

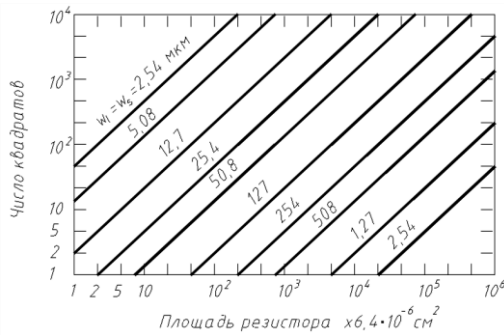


Рис. 2.23. Зависимость числа квадратов в линии пьезорезистора от площади для пьезорезистора с конфигурацией типа «меандр»

Для обеспечения высокого уровня выхода годных в процессе производства необходимо установить верхний предел величины n . Вероятность повреждения и образования дислокаций на поверхности пьезорезистора тем больше, чем длиннее полоска пьезорезистора. В то же время более узкие полоски более уязвимы, так как дефекты с меньшими размерами будут приводить к повреждению пьезорезистора. Если общее число квадратов всех пьезорезисторов на одной подложке становится слишком большим, выход годных схем падает.

Таким образом, суммарное сопротивление пьезорезисторов на подложке является более существенной величиной, чем число пьезорезисторов или значение сопротивления любого отдельного пьезорезистора. Обычно полное число квадратов ограничено величиной порядка 50 000 из соображений процента выхода годных с подложки, оптимальной ширины линии и общей площади. Тогда верхний предел суммарного сопротивления на подложке $\sum R < 5 \times 10^4 \rho_s$ [4].

Существует также практический нижний предел числа квадратов любого отдельного пьезорезистора. Может оказаться затруднительным изготовление конфигурации, состоящей из менее чем одного квадрата, с требуемой точностью. Кроме того, подгонка сопротивления оказывается более сложной.

Число квадратов

При выводе уравнения (2.40) не учитывался вклад участков прямоугольных изгибов резисторной линии. Если необходимо получить точное соотношение сопротивлений в конфигурации схемы, сопротивление этих участков должно быть учтено.

В области изгиба плотность тока не остается однородной (рис. 2.24) [19].

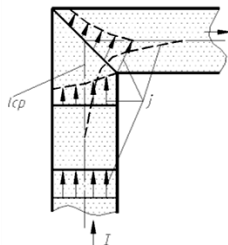


Рис. 2.24. Распределение плотности тока в пьезорезисторах типа «меандр»

Это приводит к сокращению электрической длины пьезорезистора и уменьшению его сопротивления. Неравномерное распределение плотности тока наблюдается в пределах трех квадратов области изгиба (рис. 2.25).

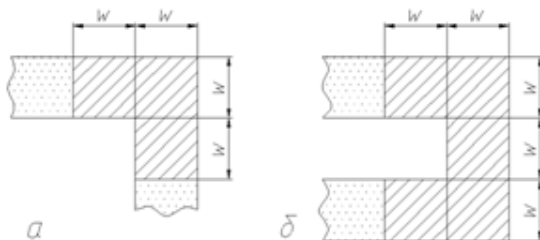


Рис. 2.25. Конструкции изгибов пьезорезисторов типа «меандр»: а – изгиб под прямым углом; б – П-образный изгиб

В связи с этим необходимо более точно интерпретировать понятие квадрата материала пьезорезистора.

Чтобы уравнения (2.38)–(2.40) оставались справедливыми, необходимо определить число квадратов, связанных с участками изгибов или других геометрических отклонений, путем подсчета их вклада в сопротивление. При этом удобно сохранить обычный расчет для прямолинейных участков $\left(\frac{l_1}{w_1}\right)$ и приписать

специальное число «квadrату» участка в углах. В действительности плотность тока и эквивалентные линии нарушаются также и на части прямолинейного участка, и,

следовательно, вклад этой части не равен $\left(\frac{l_1}{w_1}\right)$. Влияние этого

фактора будет обсуждено ниже. Существует несколько способов решения этой задачи, но наиболее простым является конформное отображение. После одного или нескольких соответствующих преобразований системы координат данная частная геометрия отображается в линейную конфигурацию прямоугольной формы, показанную на рис. 2.22, а. Результаты ряда таких расчетов приведены на рис. 2.26 [51].

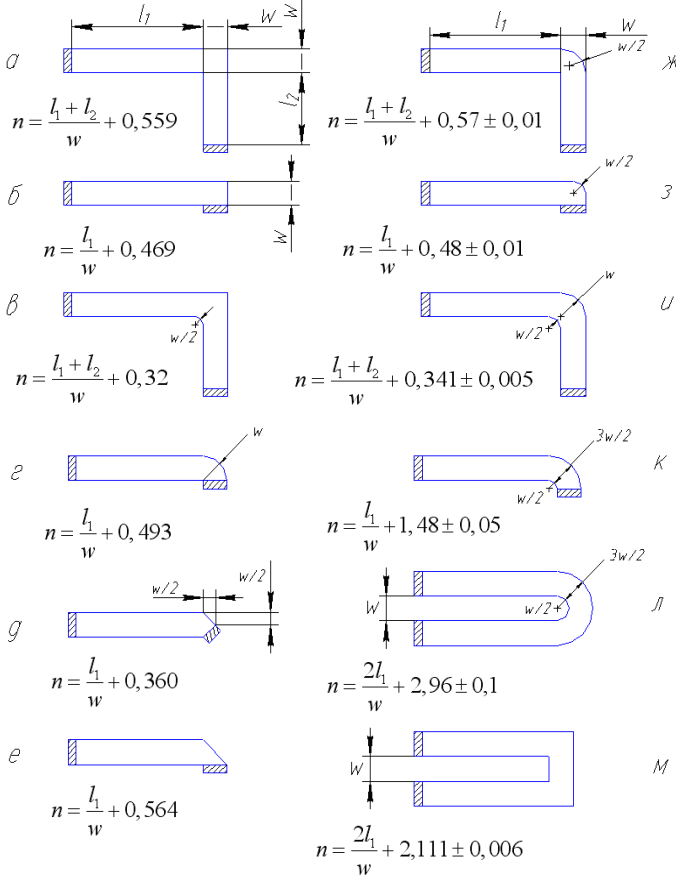


Рис. 2.26. Эффективные числа квадратов для различных конфигураций линий резисторов

Из рис. 2.26, *а* явствует, что вклад области изгиба простого прямого угла составляет 0,559 квадрата основной линии резистора. Эта величина является точной, если угол составлен двумя прямыми достаточно длинными линиями, и остается хорошим приближением, даже когда $l_2=W$. Когда $l_2=W/2$, более точным приближением будет значение 0,556. Как видно из рис. 2.26, *б*, когда l_2 стремится к нулю, вклад угла будет равен 0,469 квадрата, т. е. снизится лишь на 0,090 квадрата.

Наличие даже малого закругления на внутреннем угле прямоугольного изгиба приводит к уменьшению числа квадратов, приписываемых углу [19]. Для малых радиусов закругления r это уменьшение приближенно описывается выражением

$$\Delta n = -0,6 \left(\frac{r}{W} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (2.41)$$

при $r \ll \frac{W}{2}$.

Часто внутренний радиус создается умышленно для снижения плотности тока, обычно повышенной у резкого угла. В мощных пьезорезисторах повышение плотности тока приводит к появлению перегретых участков, которые могут вызывать избыточное изменение сопротивления этих участков. На рис. 2.26 приведены решения для прочих типов изгибов. Если решение является приближенным, указывается также значение погрешности.

Метод конформных отображений может быть использован и в случае более сложных геометрий, которые разбиваются на участки простой формы. В качестве примера, представляющего интерес для некоторых высокочастотных резисторов, рассматривается конфигурация типа решетки, показанная на рис. 2.27.

Такая конфигурация применяется, когда необходимо создать короткий и широкий резистор с малой индуктивностью, но обладающий заданным сопротивлением. Дополнительным достоинством взаимно пересекающегося рисунка является то,

что разрыв или поры в любой из узких линий, образующих рисунок, приводит лишь к незначительному изменению общего сопротивления.

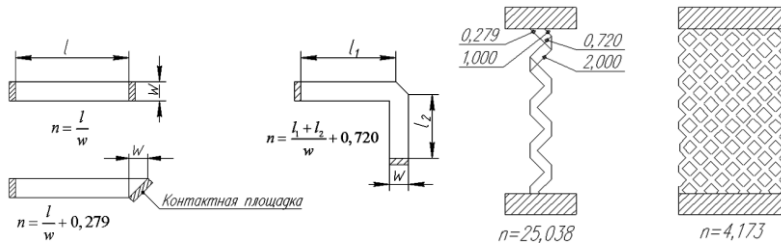


Рис. 2.27. Решетчатая конфигурация пьезорезистора и ее составные части

Определенный интерес представляют геометрии с резким изменением ширины линии, примеры которых приведены на рис. 2.28.

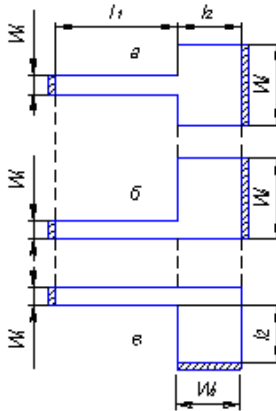


Рис. 2.28. Конфигурация пьезорезистора с резким изменением ширины линии

Число квадратов в симметричном прямоугольном сегменте, показанном на рис. 2.28, а, равно:

$$n = \frac{l_1}{W_1} + \frac{l_2}{W_2} + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{S^2 + 1}{S - 1} \ln \left(\frac{S + 1}{S - 1} \right) - 2 \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) \right],$$

где $S = \frac{W_2}{W_1}$ и $l_2 \gg \frac{W_2}{3}$.

График зависимости величины Δn от $\frac{l_2}{W_1}$ для малых l_2 приведен на рис. 2.29.

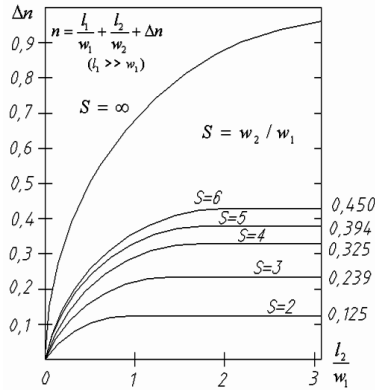


Рис. 2.29. Зависимость числа квадратов линии с резким изменением ширины от относительной длины широкой части линии (см. рис. 2.28, а) [41]

Для несимметричной формы резистора (см. рис. 2.28, б) число квадратов равно:

$$n = \frac{l_1}{W_1} + \frac{l_2}{W_2} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{S^2 + 1}{S} \ln \left(\frac{S + 1}{S - 1} \right) - 2 \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) \right],$$

где $S = \frac{W_2}{W_1}$ и $l_2 \gg \frac{2W_2}{3}$.

Число квадратов в прямоугольном изгибе с изменением ширины линии (см. рис. 2.28, в) равно

$$n = \frac{l_1}{W_1} + \frac{l_2}{W_2} + \frac{1}{S} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{4S}{S^2 - 1} \right) + \frac{S^2 - 1}{\pi S} \cos^{-1} \left(\frac{S^2 - 1}{S^2 + 1} \right),$$

где $S = \frac{W_2}{W_1}$ и $l_2 \gg W_2$.

При наличии малого радиуса закругления r на внутреннем угле изгиба число квадратов уменьшается на

$$\Delta n = -0,4 \left(\frac{S^2 + 1}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{\sqrt{W_1 W_2}} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (2.42)$$

если r меньше половины ширины наиболее узкой линии. Если $W_1 = W_2$, уравнение (2.42) переходит в (2.41).

Конфигурации с изменяющейся шириной линии применяются в основном для токоведущих дорожек, однако такие конфигурации могут применяться и в случае резисторов для выполнения специальных функций.

Влияние ошибок совмещения на погрешность сопротивления пьезорезистора

В ППЧЭ, представленном на рис. 2.1, как и в большинстве подобных изделий, контакт к пьезорезисторам образован с помощью металлизированной коммутации (например, алюминиевой), покрывающей легированный слой до начала топологического размещения пьезорезистора, как показано на рис. 2.30, где подобный вариант рассмотрен на примере пьезорезистора R1.

На практике, на поверхности легированного слоя в процессе технологического изготовления ППЧЭ, формируют слой двуокиси кремния толщиной несколько десятых долей микрометра, который служит защитой для пьезорезисторов, предохраняя их поверхность от попадания на нее влаги, загрязнений, приводящих к изменению сопротивления пьезорезистора в процессе эксплуатации.

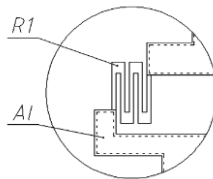


Рис. 2.30. Металлизированная коммутация к пьезорезистору

Поэтому перед нанесением металлизации для обеспечения надежного контакта с легированной областью, необходимо удалить данный защитный слой в тех местах, которые будут контактировать с проводящим слоем. Однако при проведении процесса фотолитографии по формированию так называемых окон в защитном слое возникают неизбежные погрешности совмещения, приводящие к изменению конечного сопротивления пьезорезистора. Кроме того, площадь окон не должна превышать площадь металлизации во избежание образования электрической связи между металлизацией (а значит, и пьезорезисторами) и подложкой. На рис. 2.30 пунктирной линией показана граница окон в защитном слое, т. е. алюминиевая металлизация надежно контактирует с легированным слоем и одновременно не является причиной образования контакта между пьезорезисторами и подложкой. Однако в этом случае неизбежен эффект смещения проводящего слоя (металлизации) относительно легированного слоя (пьезорезистора), приводящий к относительной погрешности сопротивления пьезорезистора.

С целью оценки данной погрешности рассмотрим упрощенную конструкцию пьезорезистора, полученной при смещении слоев, представленную на рис. 2.31 [38].

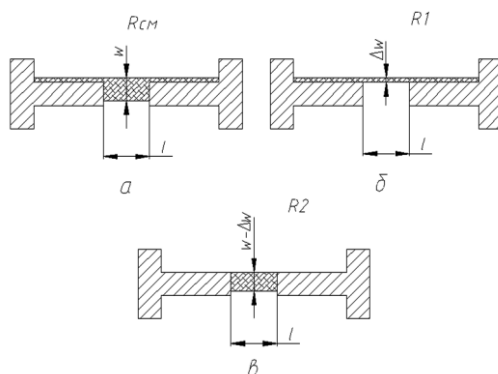


Рис. 2.31. Формы конфигурации резистора

Конфигурацию резистора R_{cm} можно представить в виде двух параллельно соединенных резисторов R_1 , R_2 , формы

которых приведены на рис. 2.31, б, в. Сопротивления резисторов R_1 , R_2 будут определяться выражениями

$$R_1 = \rho \left[(l / \Delta W) + 2n \right];$$

$$R_2 = \rho \left[l / (W - \Delta W) \right],$$

где ΔW – величина смещения; n – число квадратов углового участка резистора R_1 .

Определим сопротивление $R_{см}$:

$$\begin{aligned} R_{см} &= \rho \frac{K_1 \phi K_2 \phi}{K_1 \phi + K_2 \phi} = \frac{\left[(l / \Delta W) + 2n \right] l / (W - \Delta W)}{(l / \Delta W) + 2n + l / (W - \Delta W)} = \\ &= \rho \frac{l(1 + 2nW)}{lW + 2n\Delta W(W - \Delta W)} = \rho K_{фсм}, \end{aligned}$$

где $K_{фсм}$ – коэффициент формы резистора $R_{см}$ (отношение длины резистора к его ширине).

Преобразуем величину $K_{фсм}$ путем деления числителя и знаменателя на lW . Обозначая $K_\phi = l/W$ и $\delta W = \Delta W/W$, находим:

$$\begin{aligned} K_{фсм} &= \frac{l / W + 2n\Delta W / W}{1 + 2n\Delta W W / lW - 2n\Delta W^2 / l^2} = \frac{K_\phi + 2n\delta W}{1 + 2n\delta W / K_\phi - 2n\delta W^2 / K_\phi} = \\ &= \frac{K_\phi (K_\phi + 2n\delta W)}{K_\phi + 2n\delta W - 2n\delta W^2} = \frac{K_\phi}{1 - \left[2n\delta W^2 / (K_\phi + 2n\delta W) \right]}, \end{aligned}$$

где $K_\phi = l/W$ – коэффициент формы резистора $R_{см}$ при $\delta W = 0$, т. е. при отсутствии смещения слоев.

Найдем относительную погрешность коэффициента формы резистора $R_{см}$

$$\delta K_\phi = \frac{K_{фсм} - K_\phi}{K_\phi} = \frac{1}{1 - \left[2n\delta W^2 / (K_\phi + 2n\delta W) \right]} - 1. \quad (2.43)$$

Как видно из (2.43), погрешность коэффициента формы будет определяться величиной смещения δW и коэффициентом

формы несмещенного резистора K_Φ . Задаваясь величинами δW и K_Φ , можно определить погрешность резистора за счет смещения слоев. Необходимо отметить, что $\delta W = f(K_\Phi)$. При $K_\Phi \geq 1$ величина $\delta W = \text{const}$, т. к. $W = \text{const}$, $l = \text{var}$. При $K_\Phi < 1$ величина δW уменьшается, так как увеличивается размер W . Для $l_3 = \Delta W$ (l_3 – длина электрода смещенного резистивного элемента) число квадратов углового участка резистора $R1$ (см. рис. 2.31, б) составляет $n = 0,461$, а для $l_3 = 3\Delta W$ величина $n = 0,436$ [38].

2.5. Температурная зависимость характеристик

Полупроводниковых пьезочувствительных элементов. Температурная компенсация измерительного моста.

В мостовых схемах на основе полупроводниковых пьезорезисторов по сравнению со схемами на основе металлических пьезорезисторов отмечается сравнительно сильная зависимость коэффициента пьезочувствительности от температуры, что в ряде случаев приводит к существенным температурным погрешностям. Такие схемы после изготовления представляют собой неуравновешенные мосты с выходным сигналом, при начальной температуре не равным нулю, а при изменении температуры от начальной до максимальной еще и дополнительно изменяющимся. Уменьшить эту зависимость можно с помощью компенсационных методов и схем, когда неуравновешенные мосты преобразовываются в уравновешенные с выходным сигналом, не зависящим от изменения температуры; при этом важную роль играет температурная зависимость сопротивления и коэффициента K . Кривая зависимости сопротивления от температуры имеет чрезвычайно большую кривизну, что затрудняет компенсацию.

Для компенсации температурной погрешности применяются два метода – физико-технологический и схемотехнический. Физико-технологический метод используется при питании моста постоянным током [26, 41]. Обычно такое питание применяется в датчиках давлений с унифицированным выходным сигналом. Самостоятельные тензометрические преобразователи, имеющие в своем составе ППЧЭ, как правило,

питаются от источника напряжения. За рубежом такие преобразователи давно и широко используются в системах контроля и управления, а в последнее время такие преобразователи используются и отечественными потребителями. В этом случае для эффективной термокомпенсации выходного сигнала используется схемотехнический метод.

Задача температурной компенсации неоднократно рассматривалась в ряде работ [7, 6, 25, 26, 34, 35, 36, 40, 41], где наиболее полно представлены различные подходы к термокомпенсации, предложены оригинальные схемы построения, однако данная задача не является полностью решенной, поскольку требует разработки определенной методики и упрощения расчетов. Кроме того, для каждого конкретного ППЧЭ требуется индивидуальный подход к построению подобных схем в зависимости от сопротивлений пьезорезисторов, коэффициента пьезочувствительности, диапазона рабочих температур, давлений датчика, в состав которого входит ППЧЭ и т. д. Таким образом, невозможно построить универсальную схему термокомпенсации, подходящую для любого ППЧЭ, можно лишь выбрать или вновь разработать методику, наиболее пригодную для широкого класса элементов. Поэтому задачей данной главы является рассмотрение общих вопросов термокомпенсации моста, включающей автокомпенсацию, параллельное и последовательное подключение терморезисторов, а также принцип расчета компенсирующего устройства при питании измерительной схемы от источника напряжения или тока.

Температурная зависимость характеристик датчиков давлений на основе ППЧЭ, в первую очередь, определяется физическими свойствами полупроводников, а также особенностями конкретного конструктивного исполнения ППЧЭ в корпусе датчика. Рассмотрим эти факторы и соответствующие методы термокомпенсации.

Зависимость подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводнике от температуры обуславливает температурную зависимость сопротивления ненагруженного

пьезорезистора. Последнюю характеризует ТКС, значение и знак которого определяются типом и концентрацией носителей заряда (см. также п. 2.2). ТКС зависит от характера распределения примесей, и, следовательно, будет определяться также и структурой пьезорезистора. В равномерно легированных пьезорезисторах ТКС определяется объемной концентрацией примесей, а в диффузионных – поверхностной. На рис. 2.32 показана зависимость ТКС диффузионных пьезорезисторов p -типа проводимости от поверхностной концентрации примесей бора [6, 57].

Как видно из рисунка, зависимость ТКС имеет минимум при поверхностной концентрации примесей около $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Это означает, что для снижения ТКС пьезорезистора и влияния на него технологического разброса поверхностную концентрацию необходимо выбрать вблизи указанного выше значения. Это особенно важно при включении пьезорезисторов в симметричные схемы (мостовые, дифференциальные), т. к. температурный дрейф нуля этих схем определяется уже не абсолютной величиной ТКС пьезорезисторов, а их разбросом внутри схемы.

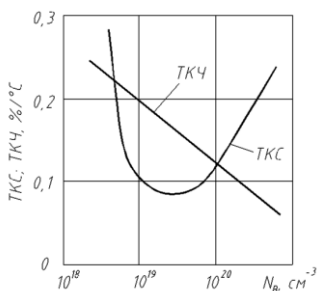


Рис. 2.32. Зависимость ТКС диффузионных пьезорезисторов p -типа проводимости от поверхностной концентрации примесей бора

Таким образом, одним из конструктивно-технологических методов термостабилизации характеристик ППЧЭ является правильный выбор степени легирования. Как правило, он определяется в результате компромисса между желаемыми чувствительностью и термостабильностью (см. также п. 2.2.1, 2.2.2).

Из рис. 2.32 видно, что выбор степени легирования пьезорезистора определяет не только его ТКС, но и температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ). Изменением концентрации примесей можно получить определенное соотношение между ТКС и ТКЧ, что, в свою очередь, может обеспечить компенсацию температурных погрешностей датчиков давлений на основе ППЧЭ, когда происходит как бы автокомпенсация температурной погрешности преобразования, поскольку при питании измерительной схемы от генератора тока уменьшение выходного сигнала в результате падения пьезочувствительности ППЧЭ точно компенсируется увеличением напряжения питания благодаря росту сопротивления пьезорезисторов. Подобная автокомпенсация ППЧЭ может быть использована для создания высокоточных датчиков давлений, работающих в широком диапазоне температур (по крайней мере, от минус 200 до 200 °С) и не требующих дополнительной схемной компенсации температурной погрешности. Как показали исследования, явление автокомпенсации может иметь место в ППЧЭ вплоть до температур порядка 500 °С [42].

Зависимость главных пьезорезистивных коэффициентов от температуры вызывает соответствующую зависимость чувствительности датчиков давлений на основе ППЧЭ. Последняя определяется температурной зависимостью пьезочувствительности пьезорезистора, которая характеризуется ТКЧ:

$$\gamma_K = \frac{\Delta K}{\Delta T},$$

где K определяется выражением (2.2).

С учетом допущений (2.10), (2.11), т. е. полагая, что

$$\pi_{11} \cong \pi_{12} \cong 0$$

для кремния p -типа проводимости, и

$$\pi_{44} \cong 0; \pi_{11} \cong -2\pi_{12}$$

для кремния n -типа проводимости, а также пренебрегая температурной зависимостью модуля Юнга, ТКЧ можно представить как

$$\gamma_K = \Delta\pi_{ii} / \Delta T,$$

где $i = 1$ или $I = 4$ для пьезорезисторов n - и p -типа проводимости соответственно.

Зависимость главных пьезорезистивных коэффициентов от температуры и концентрации примесей подробно рассмотрена в п. 2.2.1, 2.2.2.

Как и для других полупроводниковых пьезопреобразователей, температурная зависимость выходного сигнала в ППЧЭ датчиков давлений является главным источником дополнительной погрешности преобразования. В некоторых датчиках давлений уменьшение температурной погрешности достигается раздельной компенсацией температурной зависимости выходного сигнала ППЧЭ и температурной зависимости параметров электронной схемы преобразования сигнала [6]. Такой подход позволяет значительно уменьшить трудоемкость изготовления датчиков в серийном производстве, а также выпускать ППЧЭ датчиков давлений как самостоятельные средства измерения, которые все более широко используются в системах измерений и контроля.

Рассмотрим требования, предъявляемые к материалам и конструкции «идеально стабильного ППЧЭ», выходной сигнал датчика, построенного на основе данного ППЧЭ, не зависит от температуры. Для определенности возьмем ППЧЭ с наиболее широко распространенной пьезочувствительной схемой в виде активного моста с четырьмя пьезорезисторами $R_1 - R_4$, два из которых (R_1 и R_3) увеличивают свое сопротивление под влиянием деформации ППЧЭ, вызванной воздействием измеряемого механического параметра P (давления), а два других (R_2 и R_4) – уменьшают. Будем считать, что начальные сопротивления пьезорезисторов при отсутствии деформации ППЧЭ одинаковы, т. е. мост сбалансирован при начальной температуре T_0 и $R_1 = R_3$, а $R_2 = R_4$.

Сопротивления R_j пьезорезисторов зависят как от деформации ε , так и от температуры T :

$$R_j = R_j(\varepsilon, T), j = 1, 2.$$

Деформация ε пропорциональна измеряемому механическому параметру P :

$$\varepsilon = A(T)P,$$

где $A(T)$ – коэффициент упругого преобразования определяется конструкцией пьезопреобразователя, и упругими характеристиками применяемых в нем материалов.

Следует различать аддитивную и мультипликативную составляющие температурной погрешности, поскольку они имеют различное происхождение и вносят разный вклад в суммарную температурную погрешность.

Аддитивная составляющая (температурный дрейф начального сигнала в зависимости от температуры при $P = 0$) определяется разностью ТКС пьезорезисторов в смежных плечах моста

$$\gamma_{R_j} = \frac{1}{R(0, T)} \frac{\delta R(0, T)}{\delta T}.$$

Кроме того, в некоторых ППЧЭ аддитивная составляющая связана с температурными напряжениями подложки, возникающими из-за разности коэффициентов температурного расширения составляющих подложку материалов. Эта составляющая (по абсолютной величине) не зависит от выходного сигнала ППЧЭ, так что ее вклад тем больше, чем меньше чувствительность ППЧЭ к измеряемому давлению. Реализация ТКС пьезорезисторов определяется в основном технологическим разбросом электрофизических характеристик слоя кремния и геометрических размеров пьезорезисторов. Современная технология обеспечивает равенство ТКС пьезорезисторов на одном ППЧЭ с погрешностью не хуже 0,2 %, что вызывает температурный дрейф нуля ППЧЭ не более 0,02–0,05 % /10 °С.

Мультипликативная составляющая (температурный дрейф чувствительности (диапазона выходного сигнала)) связана с температурной зависимостью коэффициента пьезочувствительности ППЧЭ (электрофизических характеристик материала ППЧЭ) и упругих параметров материалов подложки; ее относительное значение не зависит от выходного сигнала ППЧЭ.

Запишем сопротивление пьезорезистора в мостовой пьезочувствительной схеме в виде

$$R_j(\varepsilon, T) = R(T)[1 + K_j(\varepsilon, T)\varepsilon], j = 1, 2,$$

где $K_j(\varepsilon, T)$ – коэффициент пьезочувствительности пьезорезистора.

Тогда выходной сигнал ППЧЭ равен [50]

$$U_u(\varepsilon, T) = U^0 \varepsilon \frac{K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)}{2 + K_1(\varepsilon, T)\varepsilon + K_2(\varepsilon, T)\varepsilon} \cong U^0 K(\varepsilon, T)\varepsilon \quad (2.44)$$

при питании мостовой схемы от источника напряжения U^0 и

$$U_i(\varepsilon, T) = \frac{i^0}{2} R(T)[K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)]\varepsilon = i^0 R(T)K(\varepsilon, T)\varepsilon \quad (2.45)$$

при питании схемы от источника тока i^0 .

В выражениях (2.44) и (2.45) $K(\varepsilon, T) = \frac{1}{2}[K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)]$ – коэффициент пьезочувствительности ППЧЭ. В выражении (2.44) учтено, что при ориентации пьезорезисторов в плоскости (001) по направлениям $\langle 110 \rangle$ $K_1(\varepsilon, T) \cong -K_2(\varepsilon, T)$ в широком диапазоне температур.

Выходной сигнал ППЧЭ не зависит от температуры при условии, что

$$\frac{1}{U(P, T)} \frac{\delta U(P, T)}{\delta T} = 0.$$

Если ввести обозначения

$$\gamma_K = \frac{1}{K(\varepsilon, T)} \frac{\delta K(\varepsilon, T)}{\delta T} - \text{ТКЧ ППЧЭ},$$

а $\gamma_A = \frac{1}{A(T)} \frac{\delta A(T)}{\delta T}$ – температурный коэффициент упругого преобразования ППЧЭ (ТКУП), то условие независимости чувствительности ППЧЭ от температуры можно записать в виде

$$\gamma_K + \gamma_A = 0, \text{ или } \gamma_K + \gamma_R + \gamma_A = 0.$$

при питании мостовой измерительной схемы ППЧЭ соответственно от источников напряжения или тока. А так как в абсолютном большинстве случаев $|\gamma_A| \ll |\gamma_R|, |\gamma_K|$ получаем, что температурные изменения чувствительности ППЧЭ определяются, главным образом, характеристиками полупроводникового материала пьезорезисторов. Следовательно, чувствительность ППЧЭ не зависит от температуры, если во всем рабочем диапазоне температур выполняются условия

$$\gamma_K \cong 0 \quad (2.46)$$

при питании мостовой схемы от источника напряжения и

$$\gamma_K + \gamma_R \cong 0 \quad (2.47)$$

при питании схемы от источника тока.

В литературе для ТКС и ТКЧ используются чаще всего выражения, полученные из линеаризованных температурных зависимостей сопротивления и пьезочувствительности. При этом, как видно из выражения (2.45), обращение в нуль суммы ТКС и ТКЧ не обеспечивает температурную стабильность чувствительности пьезопреобразователя. Для уменьшения температурной зависимости датчиков давлений с ППЧЭ используется питание мостовой пьезосхемы от генератора тока [14, 32], но получить постоянную чувствительность в достаточно широком диапазоне температур для таких ППЧЭ практически невозможно [4]. На рис. 2.33 показаны зависимости коэффициентов γ_K и $\gamma_R + \gamma_K$ от поверхностной концентрации дырок N_B для мембранных ППЧЭ с диффузионными

пьезорезисторами, рассчитанные по данным фирмы Schlumberger (Франция) [56] (см. также рис. 2.32).

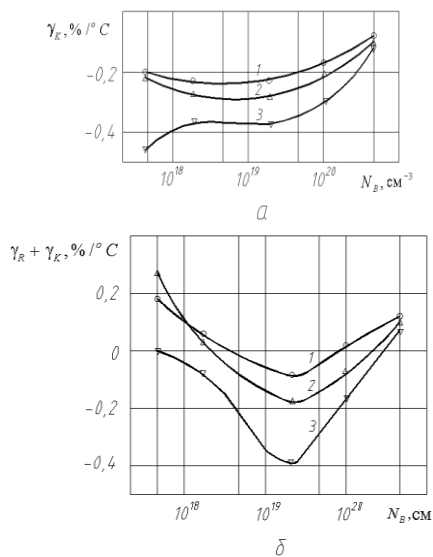


Рис. 2.33. Зависимости коэффициентов γ_K и $\gamma_R + \gamma_K$ от поверхностной концентрации дырок N_B для мембранных ППЧЭ с диффузионными пьезорезисторами:

a – зависимость ТКЧ; *б* – зависимость суммы ТКС и ТКЧ
1 – при температуре 120 °C; 2 – при 40 °C; 3 – при минус 40 °C

Как видно из рисунка, условия (2.46) и (2.47) не выполняются ни при каких значениях N_B в более или менее широком интервале температур. Поэтому обычно в ППЧЭ используют пьезорезисторы с $N_B \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и питают схему от источника тока, а получающуюся нелинейную температурную зависимость чувствительности датчика давления на основе ППЧЭ компенсируют с помощью различных электронных схем.

Поскольку методы термокомпенсации ППЧЭ при питании от источника тока и от источника напряжения существенно различаются, то целесообразно рассмотреть их отдельно и сравнить эффективность этих методов.

2.5.1. Температурная компенсация при питании током

Один из вариантов температурной компенсации ППЧЭ при питании током рассмотрим на примере методики, предложенной в [26].

Возможности физико-технологического метода компенсации и аддитивной составляющей температурной погрешности ППЧЭ при питании от источника тока связаны с особенностями топологии пьезорезистивной схемы, в которой, кроме пьезорезисторов, включены элементы балансировки замкнутого пьезомоста, позволяющие разрывом переключек изменять начальный выходной сигнал моста практически без изменения ТКС его плеч. В этом случае можно установить такой начальный выходной сигнал с ППЧЭ, что его значение не будет зависеть от температуры [22]. Значение этого сигнала $U_{0(\text{опт})}$ определяется следующим образом. При питании ППЧЭ постоянным напряжением измеряются значения начального выходного сигнала U_0 при двух температурах: $U_0(T_1)$ и $U_0(T_2)$; одновременно измеряются значения сопротивления диагонали питания пьезомоста $R_M(T_1)$ и $R_M(T_2)$. Значение оптимального начального сигнала (при питании напряжением) определяется как

$$U_{0(\text{опт})} = \frac{U_0(T_2) - U_0(T_1)}{\ln[R_M(T_1) / R_M(T_2)]}.$$

Если с помощью элементов балансировки и при питании постоянным напряжением установить такое значение начального сигнала измерительного моста, то при питании постоянным током начальный сигнал ППЧЭ практически не будет зависеть от температуры. Конечно, при этом измерительный мост будет разбалансирован, но начальный разбаланс можно легко «убрать» при преобразовании электронной схемой в датчике.

Типичный результат такого метода компенсации аддитивной составляющей температурной зависимости показан на рис. 2.34; видно, что аддитивная составляющая температурной погрешности уменьшается в десятки раз [26].

Вместе с тем результирующая температурная зависимость начального сигнала близка к параболической. Поэтому для ее

описания нельзя использовать стандартную нормировку дополнительной температурной погрешности в $\%/10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]; вместо этого имеет смысл говорить о максимальной зоне аддитивной температурной погрешности $\Delta_{\text{то}}$, подразумевая под ней максимальное изменение выходного сигнала в температурном диапазоне компенсации (см. рис. 2.34).

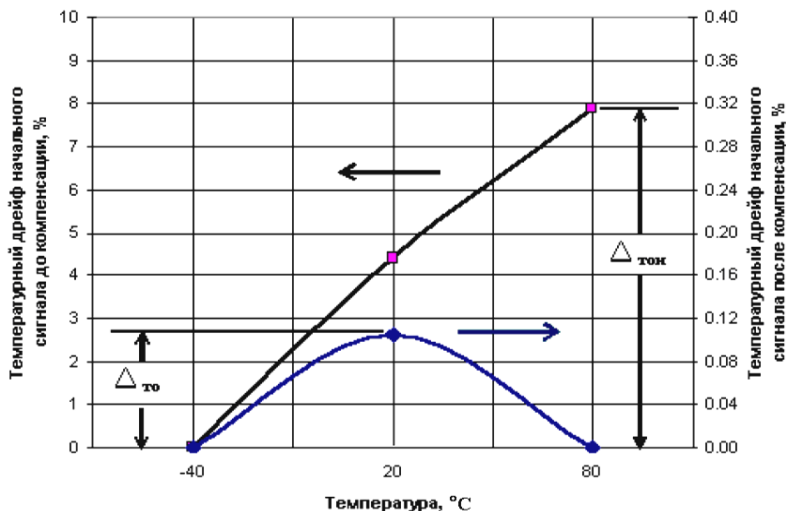


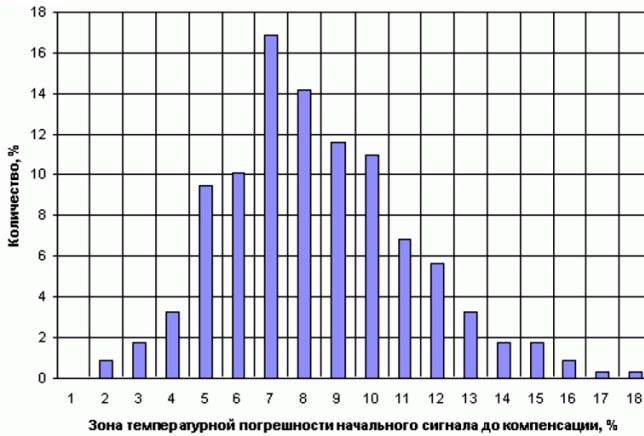
Рис. 2.34. Температурный дрейф начального выходного сигнала до и после термокомпенсации для ППЧЭ датчиков давления при питании током (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала):

$\Delta_{\text{то}}$ – зона температурной погрешности нуля ППЧЭ до компенсации;

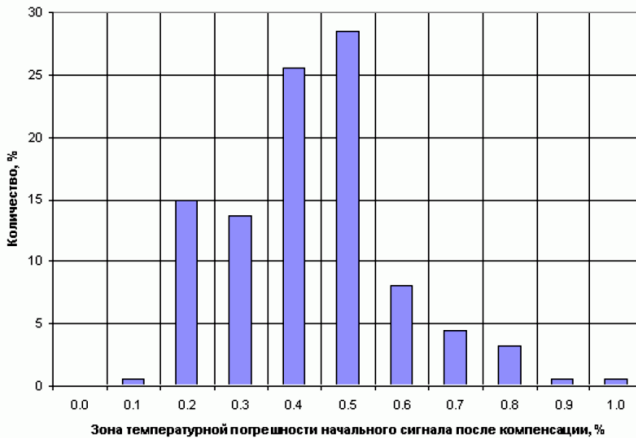
$\Delta_{\text{тон}}$ – зона температурной погрешности нуля ППЧЭ после компенсации

Такое нормирование дополнительной температурной погрешности вообще более правильно описывает свойства полупроводниковых ППЧЭ, у которых линейные температурные зависимости параметров скорее исключение, чем правило.

Типичные результаты компенсации аддитивной температурной погрешности на примере датчиков давления МИДА-01П серийного производства, в которых питание ППЧЭ осуществляется постоянным током, показаны на рис. 2.35 [26].



a



б

Рис. 2.35. Зона температурной погрешности начального сигнала ППЧЭ при питании постоянным током в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ППЧЭ). Верхний предел измерения 14 МПа, объем выборки 857 шт.:

a – исходное распределение; средняя величина $\Delta_{\text{мон}} = 7,9 \%$;

б – распределение после компенсации (в датчике);

средняя величина $\Delta_{\text{мо}} = 0,4 \%$

Как видно, в среднем аддитивная температурная погрешность датчиков уменьшается почти в 20 раз по сравнению с исходной аддитивной температурной погрешностью ППЧЭ (при этом следует учитывать, что в данные рис. 2.35, б вносит неучитываемый вклад аддитивная погрешность электронной схемы датчика).

Как уже говорилось (см. (2.47)), возможность физико-технологической компенсации мультипликативной составляющей температурной погрешности возможна при определенном значении удельного сопротивления материала пьезорезисторов, однако получить постоянную чувствительность в достаточно широком диапазоне температур практически невозможно, что связано с изменением значения оптимального удельного сопротивления в зависимости от конструкции ППЧЭ.

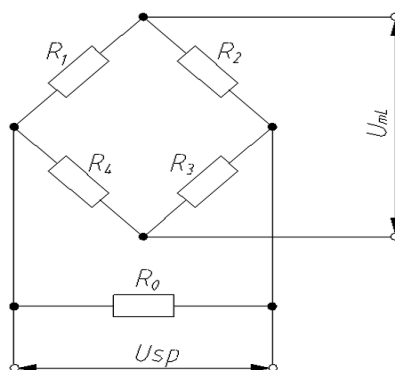


Рис. 2.36. Схема включения резистора для компенсации температурного дрейфа чувствительности при питании током

Кроме того, для достижения приемлемой коррекции значение удельного сопротивления должно выдерживаться с высокой точностью (не хуже 1–2 %), тогда как практически ППЧЭ формируются с разбросом удельного сопротивления $\pm(4...10)\%$.

Поэтому на практике требуется дополнительное использование схемотехнической компенсации

мультипликативной составляющей температурной погрешности ППЧЭ, когда параллельно питающей диагонали измерительного моста включают термoneзависимый резистор R_0 (рис. 2.36).

Значение R_0 рассчитывается по формуле [1]

$$R_0 = R_M(T_1) \frac{\frac{R_M(T_2)}{R_M(T_1)} - \frac{U_d(T_2)}{U_d(T_1)}}{\frac{U_d(T_2)}{U_d(T_1)} - 1},$$

где T_1 и T_2 – границы интервала температурной компенсации; R_M – сопротивление питающей диагонали моста; U_d – диапазон изменения выходного сигнала ППЧЭ при подаче максимального давления.

Использование термoneзависимого компенсирующего резистора R_0 позволяет устанавливать его на плате электронного преобразователя датчика, не заботясь о равенстве температур ППЧЭ и резистора.

Результат использования указанного способа коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности ППЧЭ, на примере датчиков давления МИДА-01П, показан на рис. 2.37 [26].

Как видно, температурный дрейф чувствительности датчиков в режиме самокомпенсации ППЧЭ (когда удельное сопротивление кремния оказывается близким к оптимальному) может быть достаточно мал (см. рис. 2.37, а)

Отметим, что согласно [10] зона дополнительной температурной погрешности датчика с основной погрешностью 0,1 % в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С не должна превышать $0,1 \cdot 12 = 1,2$ %. Дополнительное использование схмотехнического метода при отклонении удельного сопротивления кремния от оптимального снижает температурную погрешность чувствительности ППЧЭ в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С примерно до значения, достигаемого при самокомпенсации (см. рис. 2.37, б).

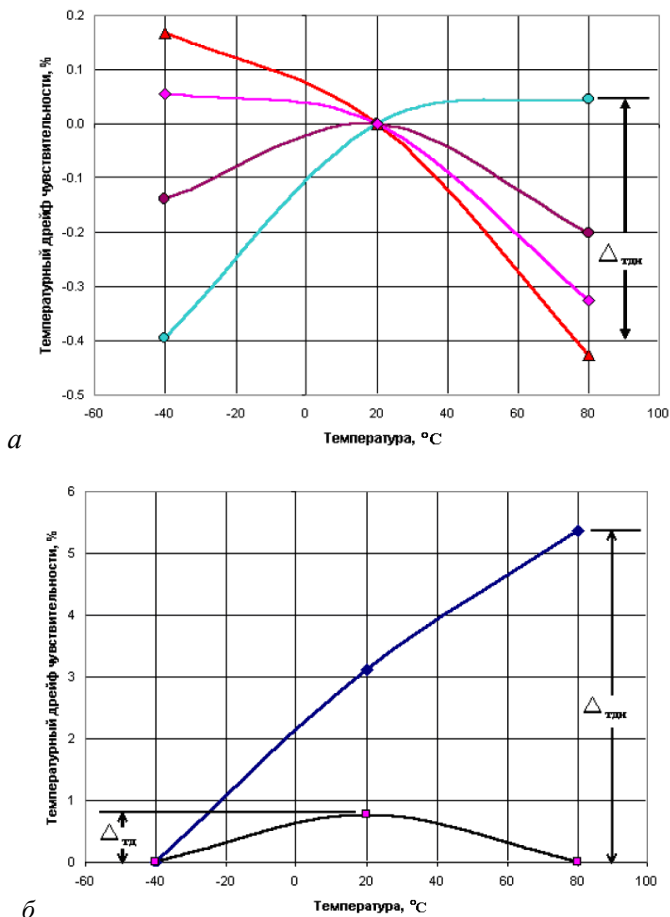


Рис. 2.37. Схемотехническая компенсация мультипликативной составляющей ППЧЭ:

$\Delta_{ТДН}$ – зона температурной погрешности чувствительности ППЧЭ до компенсации; $\Delta_{ТД}$ – зона температурной погрешности чувствительности ППЧЭ после компенсации; а – температурный дрейф чувствительности ППЧЭ датчиков давления при питании постоянным током в режиме самокомпенсации в диапазоне температур от минус 40 до 80 °C; б – температурный дрейф чувствительности ППЧЭ датчиков давления до и после термокомпенсации при питании постоянным током

Типичные результаты коррекции мультипликативной температурной погрешности на примере серийно выпускаемых датчиков давления МИДА-01П показаны на рис. 2.38 [26].

Как видно, в среднем мультипликативная температурная погрешность датчиков уменьшается почти в 5 раз по сравнению с исходной погрешностью ППЧЭ (в этих данных также присутствует неучитываемый вклад температурной погрешности электронной схемы датчика).

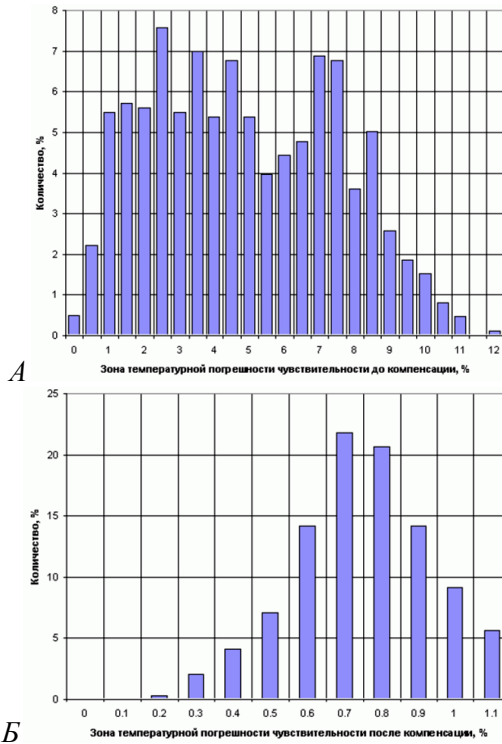


Рис. 2.38. Зона температурной погрешности чувствительности ППЧЭ датчиков давления при питании постоянным током в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С. Диапазон измерения 14 МПа, объем выборки 857 шт.:

а – исходное распределение; среднее значение $\Delta_{ТДН} = 3,9 \%$;
б – распределение после компенсации (в датчике); среднее значение $\Delta_{ТД} = 0,76 \%$

2.5.2. Температурная компенсация при питании напряжением

Температурную компенсацию ППЧЭ при питании напряжением рассмотрим на примере [26] и [50] при использовании термoneзависимых и термозависимых резисторов соответственно.

Использование термoneзависимых резисторов

Как уже говорилось выше, питание ППЧЭ постоянным напряжением позволяет, во-первых, использовать их как самостоятельные элементы в системах контроля и управления, а во-вторых, упростить электронную схему преобразования сигнала в датчике. К сожалению, в этом случае невозможно полностью исключить температурную погрешность преобразования ППЧЭ физико-технологическими методами, т. е. изменением характеристик слоя кремния или параметров пьезомоста. Вместе с тем повышение уровня легирования кремния позволяет снизить температурную зависимость как начального выходного сигнала ППЧЭ, так и его чувствительности однако при этом снижается и чувствительность ППЧЭ к измеряемому давлению, так что и в этом случае существует некоторый оптимальный уровень легирования слоя кремния, при котором отношение «выходной сигнал»/«температурная погрешность» имеет максимальное значение. Для дополнительного снижения температурной погрешности ТП в этом случае приходится использовать схемотехнические методы.

Коррекция аддитивной составляющей температурной погрешности наиболее просто осуществляется включением постоянного резистора параллельно одному из плеч измерительного моста с наибольшим значением температурного коэффициента сопротивления (рис. 2.39).

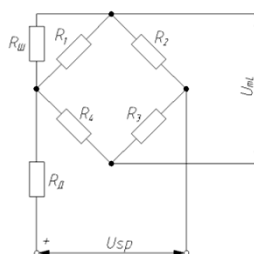


Рис. 2.39. Схема включения резистора для термокомпенсации ППЧЭ при питании постоянным напряжением

Значение резистора R_{III} выбирается из условия равенства начального выходного сигнала ППЧЭ при двух температурах T_1 и T_2 , соответствующих границам температурного диапазона компенсации:

$$\frac{R_{III}(R_1^2(T_1) - R_2^2(T_1)) - R_1^2(T_1)R_2^2(T_1)}{(R_1(T_1)R_2(T_1) + R_{III}(R_1(T_1) + R_2(T_1)))(R_1(T_1) + R_2(T_1))} =$$

$$= \frac{R_{III}(R_1^2(T_2) - R_2^2(T_2)) - R_1^2(T_2)R_2^2(T_2)}{(R_1(T_2)R_2(T_2) + R_{III}(R_1(T_2) + R_2(T_2)))(R_1(T_2) + R_2(T_2))},$$

где R_1 и R_2 – значения пьезорезисторов в смежных плечах измерительного моста.

Типичный результат такой схмотехнической компенсации аддитивной температурной погрешности показан на рис. 2.40 [26].

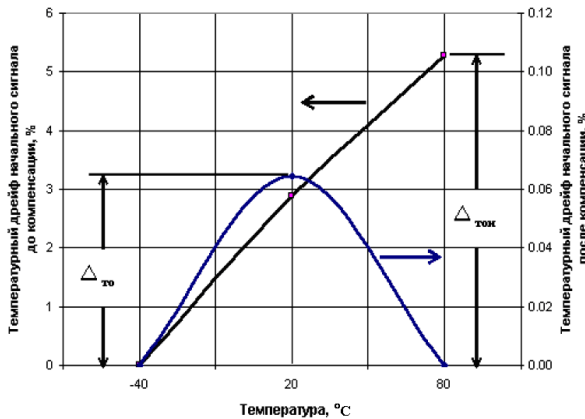


Рис. 2.40. Температурный дрейф начального выходного сигнала ППЧЭ датчиков давления (в процентах от диапазона выходного сигнала) до и после термокомпенсации при питании напряжением

Как видно, даже столь простая схема обеспечивает уменьшение зоны температурной погрешности начального выходного сигнала ППЧЭ в десятки раз. Статистика показывает, что при серийном производстве среднее значение максимальной зоны аддитивной температурной погрешности для ППЧЭ, питаемых напряжением, оказывается не хуже, чем при физико-

технологической компенсации ППЧЭ, питаемых током (рис. 2.41) [26].

Для коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности в питающую диагональ измерительного моста последовательно включается постоянный резистор R_D (см. рис. 2.39), значение которого рассчитывается по формуле

$$R_D = \frac{R_M(T_1)R_M(T_2)(U_D(T_2) - U_D(T_1))}{R_M(T_1)U_D(T_1) - R_M(T_2)U_D(T_2)}.$$

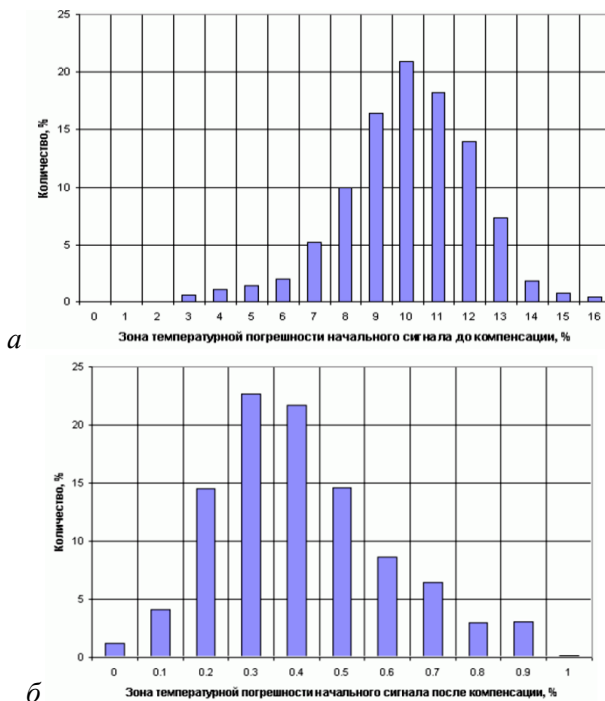


Рис. 2.41. Зона температурной погрешности начального сигнала ППЧЭ датчиков давления при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ППЧЭ). Диапазон измерения 20 МПа, объем выборки 1411 шт.:

а – исходное распределение; среднее значение $\Delta_{\text{ТОН}} = 9,7 \%$;

б – распределение после компенсации; среднее значение $\Delta_{\text{ТО}} = 0,4 \%$

Типичный результат описанной схмотехнической компенсации мультипликативной температурной погрешности ППЧЭ показан на рис. 2.42 [26].

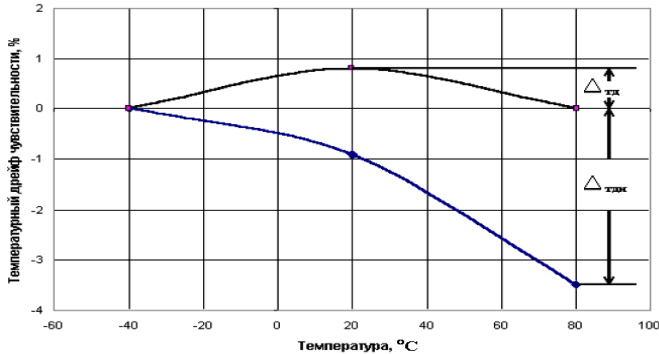


Рис. 2.42. Температурный дрейф чувствительности ППЧЭ датчиков давления до и после температурной компенсации при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80 °C

Видно, что зона температурной погрешности чувствительности ТП уменьшается в несколько раз. Отметим, что в отличие от случая питания постоянным током (см. рис. 2.37), при питании постоянным напряжением чувствительность ППЧЭ убывает с ростом температуры.

Статистическое распределение зоны температурной погрешности чувствительности ППЧЭ на примере датчиков давления МИДА-ДИ-61П при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80 °C показано на рис. 2.43 [26].

Как видно из рисунка, результирующая температурная погрешность чувствительности ППЧЭ при питании напряжением несколько больше, чем при питании током и почти вдвое больше, чем достигаемая только за счет самокомпенсации чувствительности (см. рис. 2.37, а).

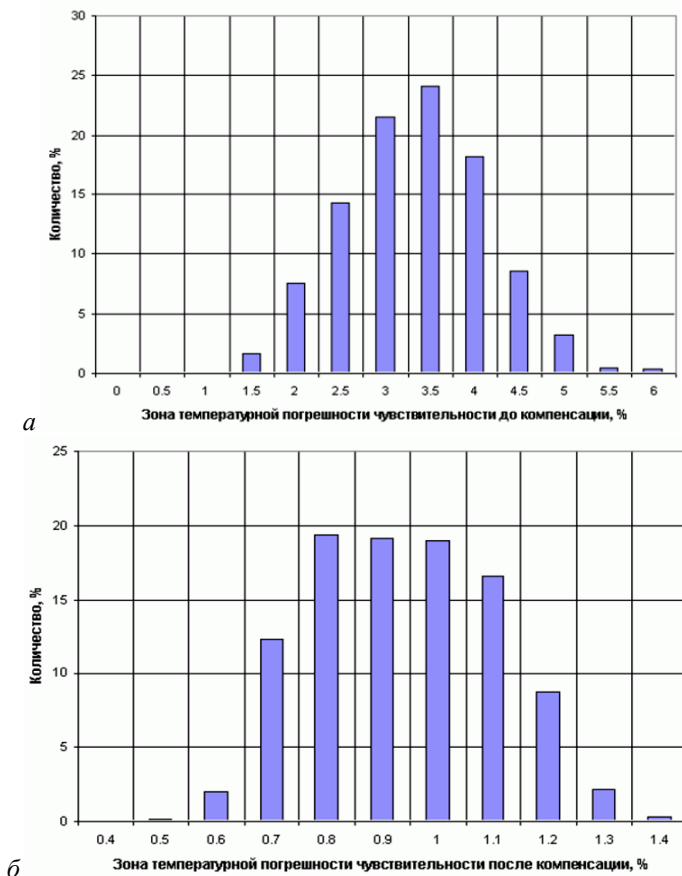


Рис. 2.43. Зона температурной погрешности чувствительности ППЧЭ датчиков давления МИДА–ДИ–61П при питании постоянным напряжением в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ППЧЭ).

Диапазон измерения 20 МПа, объем выборки 1411 шт.:

а – исходное распределение; среднее значение $\Delta_{ТДН} = 3,1 \%$;

б – распределение после компенсации; среднее значение $\Delta_{ТД} = 0,98 \%$

Как уже отмечалось, температурная зависимость выходного сигнала ППЧЭ после термокомпенсации сильно нелинейна. На рис. 2.44 показаны экспериментальные температурные

зависимости начального сигнала и чувствительности ППЧЭ МИДА-ДИ-61П, снятые подробно в диапазоне температур от минус 40 до 80 (С [26]. Как следует из рисунка, обе зависимости весьма близки к параболическим, что подтверждает обоснованность принятой методики термокомпенсации, и проверки ее эффективности по трем температурным точкам – на краю и в центре температурного диапазона компенсации.

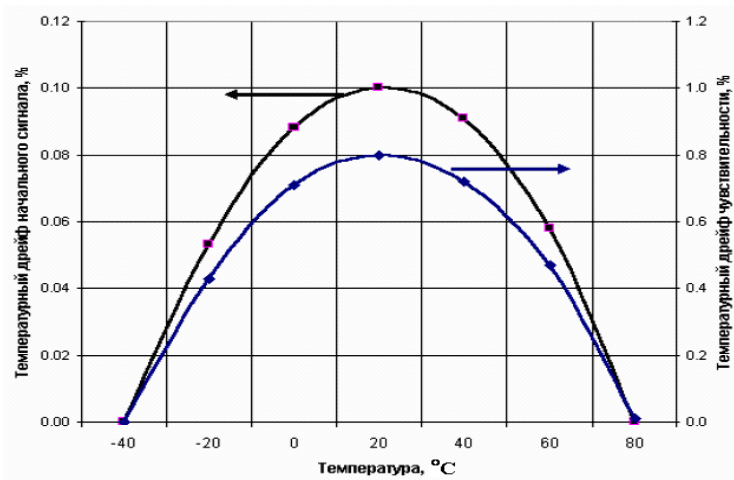


Рис. 2.44. Типичные температурные зависимости нуля и чувствительности ППЧЭ датчиков давления МИДА-ДИ-61П при питании напряжением после компенсации.
Линии – расчетные параболы

На рис. 2.45 приведены статические данные по максимальной зоне дополнительной температурной погрешности датчиков давления МИДА-ДИ-01П и МИДА-ДИ-13П [10], в которых ППЧЭ питаются соответственно от источника тока и источника напряжения [26].

Из этих данных следует, во-первых, что средние значения зоны дополнительной температурной погрешности у датчиков обоих типов близки (1,3...1,4 %), и даже питание ППЧЭ постоянным напряжением является предпочтительным, особенно если учесть, что при этом в электронной схеме датчика исключается каскад источника тока. Во-вторых, если учесть, что

согласно [10] для датчиков класса 0,1 зона дополнительной температурной погрешности не должна превышать 1,2 % (в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С) и соответственно для класса 0,2–2,4 %, для класса 0,25–3,0, то по дополнительной температурной погрешности практически все датчики МИДА-ДИ-13П удовлетворяют классу 0,25 % и около 40 % – классу 0,1 %.

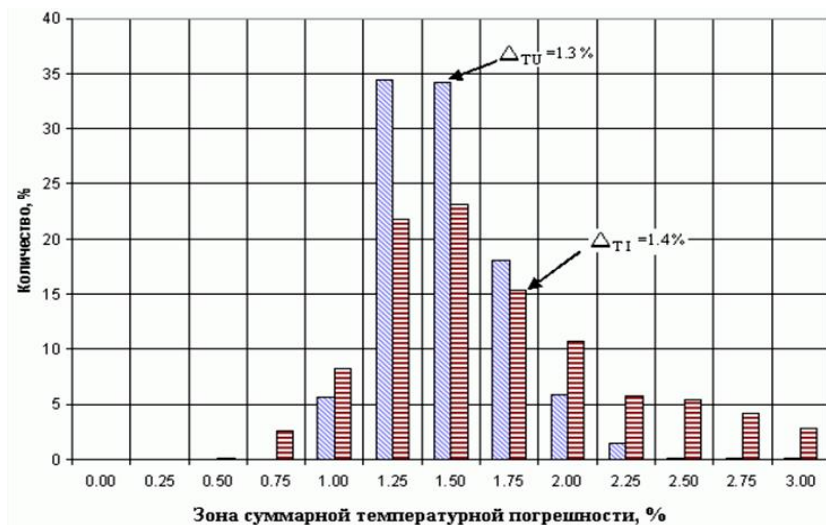


Рис. 2.45. Зона суммарной температурной погрешности датчиков МИДА-ДИ-01П и МИДА-ДИ-13П в диапазоне температур от минус 40 до 80 °С

Использование термозависимых резисторов

При питании от источника постоянного напряжения для компенсации могут быть применены две основные схемы. По схеме, представленной на рис. 2.46, а, термозависимое сопротивление, пространственно размещаемое как можно ближе к полупроводниковым пьезорезисторам, включается последовательно в цепь питания моста и должно обладать отрицательным ТКС, а для схемы, представленной на рис. 2.46, б, – положительным ТКС [50].

Значение ТКС для полупроводниковых терморезисторов может лежать в диапазоне $\pm(0,2 \dots 0,8) \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Вследствие сравнительно низких значений ТКС такого компенсирующего резистора последний по отношению к мосту должен быть низкоомным, в то время как последовательно включенное сопротивление должно быть равно сопротивлению моста или больше его.

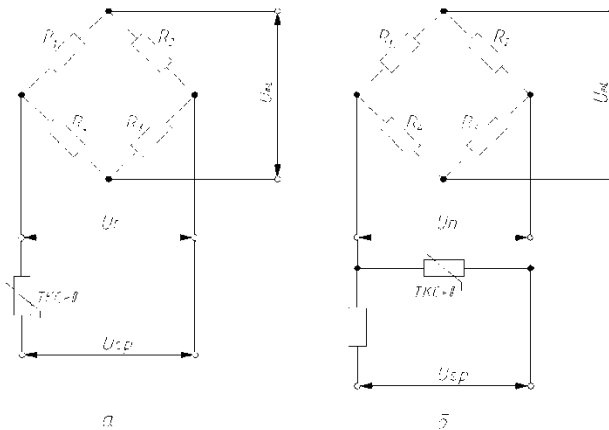


Рис. 2.46. Основные схемы температурной компенсации коэффициента чувствительности моста

Расчет компенсирующего устройства можно с приемлемыми затратами провести лишь весьма приблизительно, причем как для моста, так и для терморезистора учитываются только линейные температурные зависимости. Для простоты мы в дальнейшем будем рассматривать мост в режиме холостого хода (рис. 2.47).

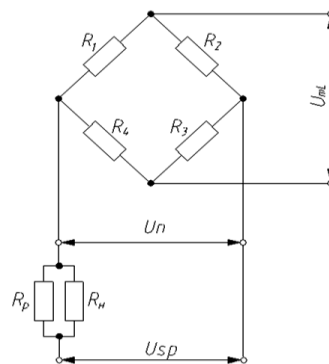


Рис. 2.47. Мост в режиме холостого хода

При параллельном включении терморезистора с отрицательным ТКС R_H и терморезистора R_p общее сопротивление R_V выразится следующим образом:

$$R_{V0} = \frac{R_p R_H (1 + \gamma_H \Delta T)}{R_p + R_H (1 + \gamma_H \Delta T)} \approx \frac{R_p R_H}{R_p + R_H} \left(1 - \gamma_H \frac{R_p}{R_p + R_H} \Delta T \right),$$

где T – температура; γ – ТКС:

$$\gamma = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta T},$$

где R_0 – сопротивление пьезорезистора при нормальной температуре.

При этом предполагается, что

$$R_V = \frac{R_p R_H}{R_p + R_H} \text{ и } \gamma_V = \gamma_H \frac{R_p}{R_p + R_H}.$$

Согласно (2.17) выходное напряжение моста можно представить в виде

$$U_{mL} = U_{SP} \frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_{VT}} B'_\varepsilon (1 + \chi_1 \Delta T) \varepsilon,$$

где χ_1 – температурный коэффициент коэффициента пьезочувствительности K :

$$\chi_1 = \frac{\delta K / K}{\delta T},$$

где δ – изменение, зависящее от температуры; $R_B = (R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4)$ – входное сопротивление (сопротивление на клеммах моста без дополнительных сопротивлений).

С учетом температурной зависимости сопротивлений имеем

$$U_{mL} \approx U_{SP} B'_\varepsilon \frac{1 + \chi_1 \Delta T}{\left(1 + \frac{R_V}{R_B} \right) \left[1 + (\gamma_V - \gamma_B) \frac{R_V}{R_V + R_B} \Delta T \right]}.$$

Устройство в первом приближении будет термонеzáвисимым, если

$$\chi_1 = (\gamma_V - \gamma_B) \frac{R_V}{R_V + R_B}.$$

Исходя из этого уравнения, можно вычислить значение шунтирующего сопротивления при выбранном значении сопротивления терморезистора с отрицательным ТКС:

$$R_p = -a_1 R_H \left[1 + \sqrt{1 - \frac{R_B}{R_H} \frac{a_2}{a_1^2}} \right],$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\chi_1 \frac{R_B}{R_H} + \frac{\gamma_B + \chi_1}{2}}{(\gamma_B + \chi_1 - \gamma_H) + \chi_1 \frac{R_B}{R_H}}, \quad a_2 = \frac{\chi_1}{(\gamma_B + \chi_1 - \gamma_H) + \chi_1 \frac{R_B}{R_H}}.$$

Таким образом, методы термокомпенсации ППЧЭ при питании от источника тока и от источника напряжения существенно различаются, поэтому целесообразность и эффективность их использования необходимо рассматривать с учетом комплексного показателя, учитывающего требования по надежности, мощности питания, входного сопротивления моста, значения температурной погрешности.

2.6. Вывод функции преобразования полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений

Индивидуальной функцией преобразования измерительного преобразователя называется зависимость информативного параметра его выходного сигнала от информативного параметра входного сигнала [29].

Индивидуальную функцию преобразования любого измерительного преобразователя представляют в виде полинома

$$Y = f(x) = \sum_{k=0}^l a_k X^k,$$

где a_k – коэффициенты функции преобразования; X – информативный параметр входного сигнала; $k = 0, 1 \dots l$ – показатель степени входного сигнала и индекс соответствующего коэффициента в полиноме, выражающем функцию преобразования.

Степень l полинома следует выбирать на стадии проектирования конкретного типа измерительного преобразователя из ряда 1, 2, 3, обеспечивая минимальное значение составляющей основной погрешности измерительного преобразователя, обусловленной аппроксимацией градуировочной характеристики измерительного преобразователя индивидуальной функцией преобразования.

В необходимых случаях индивидуальная функция преобразования измерительного преобразователя может быть представлена в виде логарифмической, экспоненциальной или иной функции, параметры которой рекомендуется определять методом наименьших квадратов.

Коэффициенты индивидуальной функции преобразования измерительного преобразователя определяются по результатам градуирования измерительного преобразователя во всем диапазоне измерений с постоянным шагом изменения входного сигнала и числом фиксированных значений входного сигнала $m \geq 8$ или при заданных значениях входного сигнала $X_{\min}$; $X_{\min} + 0,125N$; $X_{\min} + 0,5N$; $X_{\min} + 0,875N$; $X_{\max}$ ($m = 5$; $N = X_{\max} - X_{\min}$), где N – нормирующее значение входного сигнала; m – индекс значения входного сигнала в диапазоне измерений при градуировании.

Число циклов градуирования назначают $n \geq 4$, обеспечивая получение общего числа наблюдений $2nm \geq 40$. Каждый цикл градуирования начинают при одном и том же значении начального сигнала на входе измерительного преобразователя.

Для каждой точки градуирования по упорядоченной выборке результатов наблюдений $Y_{j1}^{(M,B)} \leq Y_{j2}^{(M,B)} \leq \dots \leq Y_{ji}^{(M,B)} \leq \dots \leq Y_{j2n}^{(M,B)}$ рассчитывают значения выходного сигнала, определяющие градуировочную характеристику:

$$Y_j = \frac{Y_{j(t+1)}^{(M,Б)} + Y_{jn}^{(M,Б)} + Y_{j(n+1)}^{(M,Б)} + Y_{j(2n-t)}^{(M,Б)}}{4},$$

где Y , Y^M , $Y^Б$ – информативный параметр выходного сигнала; $j = 1, 2, \dots, m$ – индекс значения выходного сигнала в диапазоне измерений при градуировании; $i = 1, 2, \dots, n$ – порядковый номер повторения опыта; $t = [2n/4]$ – целая часть числа $2n/4$.

Коэффициенты a_k индивидуальной функции преобразования измерительного преобразователя определяют по формуле

$$A = (X^T X)^{-1} X^T J;$$

где $A = \|a_k\| = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_l \end{pmatrix}; X = \|X_{jk}\| = \begin{pmatrix} X_{10} X_{11} \dots X_{1l} \\ X_{20} X_{21} \dots X_{2l} \\ \dots \dots \dots \\ X_{j0} X_{j1} \dots X_{jl} \\ \dots \dots \dots \\ X_{m0} X_{m1} \dots X_{ml} \end{pmatrix};$

$$X_{jk} = X_j^k (j=1, 2, \dots, m; k=0, 1, \dots, l);$$

X^T – транспонированная матрица;

$$J = \|Y_i\| = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_j \\ \dots \\ Y_m \end{pmatrix};$$

$k = 0, 1, \dots, l$ – показатель степени входного сигнала и индекс соответствующего коэффициента в полиноме, выражающем функцию преобразования.

Существует необходимость вывода функции преобразования измерительного преобразователя, в том числе

ППЧЭ датчиков давлений, на этапе проектирования, когда нет возможности получения градуировочной характеристики ППЧЭ.

Для ППЧЭ датчиков давлений функция преобразования $f(P)$ представляет собой зависимость выходного сигнала ($U_{\text{вых}}$) от прилагаемого давления. В свою очередь, $U_{\text{вых}}$ зависит от прилагаемого давления (P), чувствительности к давлению (S) (крутизны характеристики) и напряжения питания (U_0) следующим образом [6]:

$$U_{\text{вых}} = PSU_0. \quad (2.48)$$

Чувствительность зависит от геометрических размеров и конструкции (топологии) ППЧЭ (см. п. 2.4.1, 2.4.2).

Рассмотрим вывод функции преобразования на примере конструкций, представленных в п. 2.4.1 (см. также рис. 2.1), 2.4.2, являющихся наиболее распространенными вариантами построения ППЧЭ датчиков давлений.

Чувствительность ППЧЭ на рис. 2.18 и 2.1 равна [6]

$$S = 0,302\pi_{44}a^2/h^2, \quad (2.49)$$

где a – половина стороны квадрата (заштрихованная область) (радиус в случае ППЧЭ с круглой мембраной); h – толщина мембраны.

С учетом (2.48), (2.49) функция преобразования для ППЧЭ с пьезорезисторами p -типа, расположенными на мембране (100), будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}}^p(P) = P \cdot U_0 \cdot 0,302\pi_{44}a^2/h^2. \quad (2.50)$$

Чувствительность ППЧЭ на рис. 2.20 равна [6]

$$S = 0,453\pi_{11}a^2/h^2. \quad (2.51)$$

С учетом (2.48, 2.51) функция преобразования для ППЧЭ с пьезорезисторами n -типа, расположенными на мембране (100), будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}}^n(P) = P \cdot U_0 \cdot 0,453\pi_{11}a^2/h^2. \quad (2.52)$$

Проведем сравнение двух рассмотренных вариантов ППЧЭ между собой. Для наглядности предположим, что толщина мембраны $h = 300$ мкм, половина стороны квадрата $a = 0,8$ мм, давление изменяется в диапазоне от 0,1 до 1 МПа, а напряжение питания составляет значение 6 В. Данные для π_{11} , π_{44} возьмем из табл. 2.3.

На рис. 2.48 представлены расчетные градуировочные характеристики для данных ППЧЭ с учетом (2.50, 2.52).

Из рисунка видно, что при максимальном давлении амплитуда выходного сигнала для ППЧЭ с пьезорезисторами n -типа, расположенными на мембране (100), будет приблизительно на 10 мВ выше, чем для ППЧЭ с пьезорезисторами p -типа, расположенными на мембране (100), что, тем не менее, не может являться определяющим фактором для предпочтения того или иного варианта.

Экспериментальные значения $U_{\text{вых}}$ будут несколько ниже, чем указано на рисунке 2.48 из-за геометрических размеров пьезорезисторов.

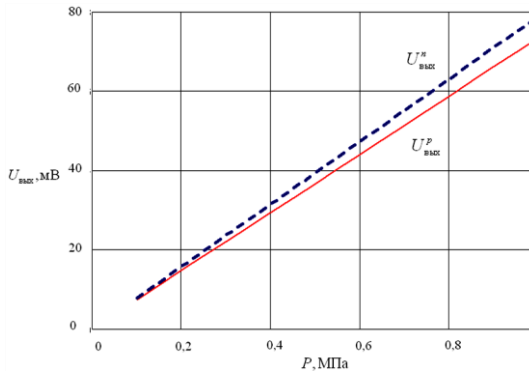


Рис. 2.48. Расчетные градуировочные характеристики для двух типов ППЧЭ

3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЬЕЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ

3.1. Обобщенная технологическая последовательность изготовления полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений

Согласно [31] Технологическим процессом (ТП) называется часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. ТП изготовления любого ПТЧЭ из двух кремниевых пластин включает в себя около десяти блоков технологических операций, каждый из них, в свою очередь, состоит из отдельных технологических операций; их количество варьируется от 2 до 20. Так как некоторые из вышеназванных блоков и операций в процессе изготовления повторяются несколько раз, то весь ТП содержит около 500 технологических операций.

В связи с этим, в рамках данной работы, невозможно разобрать и проанализировать каждую, отдельно взятую операцию. Целью этого раздела является рассмотрение всего ТП изготовления в целом с учетом [30] и применительно к формированию ПТЧЭ, конструкция которого представлена на рис. 2.1. Данный ПТЧЭ, как уже упоминалось, является типичным представителем своего класса, и содержит все те элементы, которые свойственны подобным конструкциям для использования их в качестве чувствительных элементов датчиков давлений.

Согласно [30] типовой ТП изготовления ПТЧЭ должен состоять из следующей последовательности блоков:

- очистка пластин перед физико-термическим процессом;
- окисление пластин (маскирующее);
- формирование слоев методом фотолитографии на планарной стороне пластины;
- очистка пластин перед физико-термическим процессом;

- диффузия бора из твердого источника;
- формирование слоев методом фотолитографии;
- очистка перед физико-термическим процессом;
- окисление (деканализирующее);
- формирование слоев методом фотолитографии;
- ионное легирование (защитная маска из фоторезиста);
- очистка пластин перед термической обработкой;
- термическая обработка пластин;
- формирование слоев методом фотолитографии;
- очистка пластин перед напылением алюминия;
- напыление алюминия;
- формирование слоев методом фотолитографии;
- очистка пластин перед термической обработкой;
- термическая обработка пластин (вжигание алюминия);
- нанесение защитной пленки на пластины;
- формирование защитной маски на пластинах;
- очистка перед нанесением защитной пленки;
- нанесение защитной пленки на пластины;
- формирование слоев методом фотолитографии;
- формирование защитной маски на пластинах;
- анизотропное травление пластин;
- очистка перед нанесением защитной пленки на пластины;
- нанесение защитной пленки на пластины;
- формирование слоев методом фотолитографии;
- формирование защитной маски;
- плазмохимическое разделение пластин на кристаллы.

Данная последовательность является определяющей при разработке ТП изготовления любого ПТЧЭ. Однако она не является строго универсальной и не учитывает конструктивных особенностей того или иного чувствительного элемента. При разработке ТП изготовления относительно конкретного ПТЧЭ необходимо изменять приведенную последовательность, а также

добавлять или исключать отдельные операции, в соответствии с конструкторской документацией. Например, ТП изготовления ПТЧЭ, представленного на рис. 3.1 и с учетом [30] и состоит из следующей последовательности блоков:

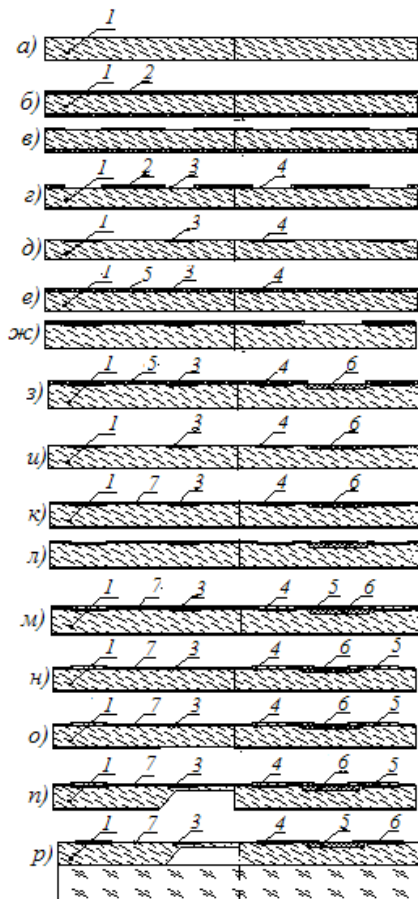


Рис. 3.1. Технологический процесс изготовления полупроводникового тензорезистивного чувствительного элемента:

- 1 – подложка; 2 – маскирующий слой двуокиси кремния;
 3 – тензорезистор; 4 – коммутационная шина; 5 – защитный слой фоторезиста; 6 – терморезистор; 7 – защитный слой двуокиси кремния; 8 – контактная металлизация изготовления

- очистка пластин перед физико-термическим процессом (см. рис. 3.1, а);
- окисление пластин (маскирующее) (см. рис. 3.1, б);
- формирование окон в слое двуокиси кремния под тензорезисторы и коммутационные шины методом фотолитографии на планарной стороне пластины (см. рис. 3.1, в);
- диффузия бора из твердого источника (см. рис. 3.1, г);
- окисление (разгонка) (см. рис. 3.1, з);
- травление маскирующего слоя двуокиси кремния (см. рис. 3.1, д);
- нанесение маскирующего слоя фоторезиста на планарную сторону пластины (см. рис. 3.1, е);
- формирование окна в слое фоторезиста под терморезистор методом фотолитографии на планарной стороне пластины (см. рис. 3.1, ж);
- ионное легирование бора (см. рис. 3.1, з);
- окисление (разгонка) (см. рис. 3.1, з);
- травление маскирующего слоя фоторезиста (см. рис. 3.1, и);
- окисление пластин (защитное) (см. рис. 3.1, к);
- формирование окон в слое двуокиси кремния под проводники и контактные площадки методом фотолитографии на планарной стороне пластины (см. рис. 3.1, л);
- напыление алюминия (см. рис. 3.1, м);
- травление алюминия (см. рис. 3.1, н);
- термическая обработка пластин (вжигание алюминия) (рис. 3.1, н);
- формирование окон в слое двуокиси кремния под мембрану методом фотолитографии на непланарной стороне пластины (см. рис. 3.1, о);
- анизотропное травление пластин (см. рис. 3.1, п);
- электростатическое соединение в вакууме с образованием вакуумированной полости (см. рис. 3.1, р).

Кроме того, таким операциям, как нанесение (формирование) слоев, термическая обработка и другие, предшествует химическая очистка пластин, последовательность и режимы которой зависят от последующей операции.

Далее подробно рассмотрим каждый из приведенных и некоторых других блоков, не упомянутых выше, но использующихся при изготовлении многих ПТЧЭ датчиков давлений.

3.2. Химическая обработка пластин

Очистка поверхности кремниевых пластин проводится для удаления органических и неорганических загрязнений, окисных пленок, оказавшихся на поверхности на предыдущих стадиях обработки, а также для удаления остатков травителей.

Изменение электрофизических свойств поверхности полупроводниковой пластины в основном определяется ее физико-химическим взаимодействием с окружающей средой, в качестве которой могут выступать газы (кислород, азот, водород, сероводород и др.), пары (вода, органические вещества) и конденсированные среды (органические и неорганические) жидкие и твердые. Реальная поверхность полупроводника весьма склонна к адсорбции примесей из газовой фазы и растворов (загрязнению) ввиду своей геометрической (микро- и макродефекты), а, следовательно, и энергетической неоднородности.

Геометрические неоднородности, увеличивая поверхность кристалла, повышают его поверхностную энергию, которую кристалл старается снизить, адсорбируя поверхностно-активные примеси из окружающей среды, что и является основной причиной загрязнения, а, следовательно, и нестабильности поверхностного слоя.

Процесс адсорбции примесей из окружающей среды (жидкой или газообразной) имеет место практически на всех технологических операциях процесса изготовления ПТЧЭ датчиков давлений, но наиболее существенное влияние на его параметры оказывают примеси, адсорбированные из растворов в процессе травления и промывки полупроводниковой пластины.

Необходимо отметить, что уравнения изотерм адсорбции, широко применяемые для описания процессов адсорбции из газовой фазы, могут быть использованы и для анализа процессов адсорбции примесей из растворов. Наибольшее распространение

для описания процессов адсорбции примесей на поверхности полупроводниковой пластины имеют линейное уравнение Генри:
 $(\Gamma = z_c b C),$

справедливое в области микроконцентраций примесей;
уравнение мономолекулярной адсорбции Лангмюра:

$$\Gamma = z_c b C / (1 + b C),$$

переходящее в уравнение Генри при малых концентрациях примесей ($b C \ll 1$), и эмпирическое уравнение Фрейндлиха:

$$(\Gamma = z_c b C^n, \text{ где } 0 < n < 1),$$

где Γ – значение адсорбции; z_c – сорбционная емкость монослоя; C – концентрация; b – константа адсорбционного равновесия, представляющая собой отношение констант скоростей адсорбции и десорбции примесей, поэтому она может быть определена из уравнения свободной энергии Гиббса и выражения для константы термодинамического (в частности, адсорбционного) равновесия, т. е.:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = -RT \ln b, \quad (3.1)$$

или, потенцируя, получаем для b выражение

$$b = e^{-\Delta H/RT} e^{\Delta S/R} = b_0 e^{-\Delta H/RT} = b_0 e^{Q/RT}, \quad (3.2)$$

где b_0 – энтропийный множитель;

Q – теплота адсорбции;

$\Delta H, \Delta S$ – соответственно изменения энтальпии и энтропии при адсорбции;

T – температура адсорбции.

Например, уравнение Лангмюра для адсорбции двух примесей из неадсорбирующегося растворителя будет иметь вид:

$$\Gamma_{1(2)} = \frac{z_c b_{1(2)} C_{1(2)}}{1 + b_1 C_1 + b_2 C_2}. \quad (3.3)$$

Анализируя последнее выражение, можно отметить: примеси адсорбируются из раствора не только пропорционально

их концентрации в растворе, но и пропорционально константе адсорбированного равновесия (теплоте адсорбции), т. е., несмотря на малую концентрацию отдельных примесей в растворе, их концентрации на поверхности ввиду сродства адсорбент–адсорбат (большая теплота адсорбции) могут быть весьма значительными (рис. 3.2).

Аналогичные процессы происходят для одновременно протекающей адсорбции трех, четырех и более примесей.

Поэтому после завершения любой операции химической очистки необходимо проводить длительную промывку в деионизованной воде (деионизованная вода получается при пропускании дистиллированной воды через ионно-обменные смолы) до установления удельного сопротивления воды на выходе не менее 1 МОм·см, что позволит в некоторой степени снизить эффект адсорбции примесей.

Загрязнения могут быть разделены по типу их физико-химического взаимодействия с поверхностью полупроводника на физические и химические.

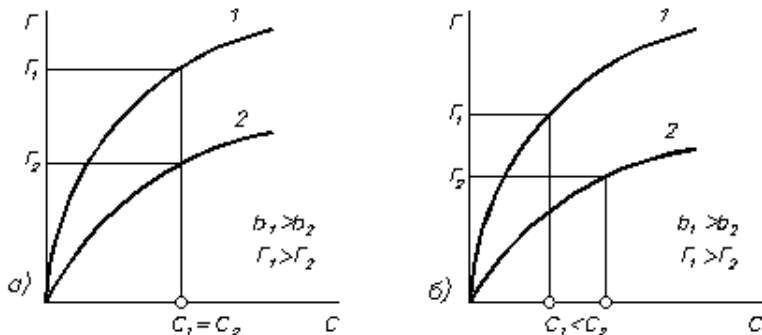


Рис. 3.2. Изотермы адсорбции примесей из раствора на поверхности пластин:

а – теплота адсорбции примеси 1 больше теплоты адсорбции примеси 2; б – примесь 1, несмотря на меньшую концентрацию в растворе ($C_1 < C_2$), адсорбируется на поверхности в большей концентрации

Физические (или механические) загрязнения, связанные с поверхностью силами физической адсорбции, подразделяются на неорганические (пыль, волокна, абразивные и металлические частицы) и органические (жировые пленки, остатки ионообменных смол из промывочной воды, частицы фоторезиста, микроорганизмы, частицы эпителия оператора и др.).

Физическая адсорбция загрязнений к поверхности полупроводникового материала происходит в результате межмолекулярного взаимодействия, вызываемого силами Ван-дер-Ваальса, а также электростатической поляризации (кулоновского взаимодействия заряженных частиц) и является обратимым процессом. Некоторые адсорбированные частицы могут преодолеть силы, связывающие их с поверхностью, и перейти в исходную фазу (десорбироваться).

Неорганические загрязнения удаляют гидромеханической очисткой или сдувают струей очищенного азота.

Органические загрязнения при термической обработке разлагаются с образованием атомов углерода, которые служат центрами дефектообразования. Органические загрязнения принято разделять на полярные и неполярные в зависимости от величин их дипольного момента и диэлектрической проницаемости молекул.

Полярные органические загрязнения, к которым относятся жирные кислоты (олеиновая, стеариновая и др.), канифоль, синтетические полярные вещества и др., обладающие значительными дипольными моментами. Они чаще всего ориентированы в монослой (особенно на силанольной поверхности кремния $Si-OH$), поэтому их плотная упаковка в поверхностном слое обеспечивает малую величину удельной поверхности загрязнения.

Неполярные органические загрязнения, к которым относятся различные минеральные масла, вазелин, нефтяные воски (парафины) и др., характеризуются небольшими величинами дипольных моментов, на поверхности они располагаются хаотически (не ориентированы), образуя слой загрязнения с большой величиной удельной поверхности, а следовательно, и величиной поверхностной энергии. Такая

поверхность не является термодинамически устойчивой, поэтому неполярные органические загрязнения могут вбирать в себя полярные, что ведет к естественному снижению величины поверхностной энергии, т. е. термодинамически выгодно.

Нерастворимые в воде органические жировые загрязнения делают поверхность пластины гидрофобной, т. е. плохо смачиваются водой. Для равномерной очистки поверхность необходимо перевести в гидрофильное, т. е. хорошо смачиваемое состояние. Удаление жировых загрязнений, сопровождаемое переводом поверхности из гидрофобного состояния в гидрофильное, называют обезжириванием.

Органические загрязнения удаляют отмывкой в органических растворителях или их арах. Сначала в неполярных или слабополярных растворителях (бензоле, толуоле, четыреххлористом углероде, некоторых фреонах) отмывают неполярные загрязнения, а затем – в спиртах, ацетоне, трихлорэтилене – полярные.

Химические загрязнения требуют большей энергии для удаления с поверхности, т. к. связаны с ней силами хемосорбции, когда образуются прочные ковалентные или ионные связи между атомами адсорбированного вещества и поверхности. Это необратимый процесс. В качестве примера химических загрязнений можно назвать окисные и сульфидные пленки, катионы и атомы металлов и др. Наиболее опасными и трудно удаляемыми химическими примесями являются примеси металлов в элементарном состоянии, электроосажденные в порах, труднорастворимые окислы и др.

Химические загрязнения бывают ионными и атомными. Ионными загрязнениями являются растворимые в воде соли, кислоты и основания, которые осаждаются на поверхности пластин из моющих и травильных растворов, полирующих суспензий, металлической основы режущих дисков, шлифовальников и полировальников. Атомные загрязнения осаждаются в виде микрочастиц из атомов золота, серебра, меди, железа, имеющих в химических реактивах, и могут покрывать всю поверхность и даже образовывать микроскопические слои.

Химические загрязнения удаляют в кислотах, часто в смеси с сильными окислителями, комплексообразователях или поверхностно-активных веществах.

В первую очередь при очистке удаляют органические загрязнения и химически связанные с поверхностью пленки, а затем – ионные и атомные.

Основными источниками различных загрязнений являются абразивные и клеящие материалы, применяемые при механической обработке полупроводниковых пластин; пыль, находящаяся в воздухе производственных помещений; оборудование, оснастка, а также тара для транспортировки и хранения пластин; технологические среды, органические и неорганические реагенты, промывочная вода. Существенными источниками загрязнений являются одежда, эпителий, косметика, бактерии, вирусы и жировые отпечатки пальцев оператора.

Применяемые при очистке методы и составы должны быть инертны по отношению к обрабатываемому полупроводниковому материалу, минимально токсичными и пожаробезопасными. Химреактивы, газы и вода должны иметь высокую степень чистоты, чтобы, в свою очередь, не вносить загрязнения. Оборудование, на котором выполняют очистку, должно конструироваться по принципу «бесконечного разбавления» (каскадные ванны, обработка в парах и др.).

Поскольку получить однозначную информацию о действии отдельных видов загрязнений на общий процент выхода годных ПТЧЭ и установить предел допустимых загрязнений очень трудно, необходимо стремиться к тому, чтобы на конечных операциях очистки произошло практически полное удаление всех возможных загрязнений.

Отсюда можно определить основные принципы, на которых базируется технология очистки пластин на любой стадии ТП:

- технологические процессы должны состоять из ряда последовательных операций, из которых каждая предназначена для удаления одного или нескольких видов загрязнений. Технологические процессы должны быть увязаны с общим технологическим маршрутом изготовления датчика в целом;

- для химической очистки подложек следует применять вещества, у которых продукты взаимодействия с загрязнениями легко удаляются с поверхности при последующей обработке;

- материалы для химической очистки должны быть особо чистыми веществами.

Все варианты очистки полупроводниковых пластин в процессе изготовления любого ПТЧЭ в конечном итоге, сводятся к следующей последовательности комплексов операций:

- удалению физических загрязнений;
- удалению химических загрязнений;
- удалению продуктов химической обработки (промывка);
- сушка пластин.

В зависимости от цели очистки поверхностных слоев полупроводниковых пластин применяют множество химических реагентов (органических и неорганических) с соответствующими характеристиками. При этом происходит превращение металлических примесей, окислов и жиров в растворимые в воде соединения, которые промывкой в воде могут быть легко удалены с поверхности. После воздействия химических реагентов пластины отмываются в деионизованной воде (с сопротивлением не менее 20 МОм·см) для удаления остатков раствора, адсорбированного на поверхности.

Существует множество групп химической очистки в зависимости от последующей операции ТП. Для каждой из групп различными авторами были предложены множество вариантов последовательности операций, рассмотренные на уровне их теоретического анализа, которые содержат незначительное количество этапов обработки, являются стандартными и на каждом этапе ТП изготовления полностью удовлетворяют требования последующих технологических операций по чистоте подложки [59, 61, 50, 64].

Одним из широко используемых методов химической очистки является процесс, разработанный фирмой RCA и в общем согласующийся с требованиями [30], состоящий из следующей последовательности (объемные соотношения) [60]:

- $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ (1:1) при 60°C в течение 40 минут – удаляются органические загрязнения, ионы металлов;
- $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ (5:1) при 20°C в течение 10 секунд – удаляется пленка окисла кремния, образовавшаяся после обработке в сильно окислительной среде предыдущей операции;
- $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:6) при 80°C в течение 12 минут – удаляются механические частицы, органические загрязнения;
- отмывка в деионизованной воде после обработки в каждом из реагентов;
- сушка.

Операция сушки осуществляется с помощью центрифуги, что является наиболее производительным методом, а дополнительная отмывка водой в камере центрифуги позволяет сократить уровень привносимых загрязнений по вине оператора ТП.

Данная последовательность полностью удовлетворяет требования по очистке поверхностей пластин от химических, физических загрязнений, а также удалению продуктов химической обработки перед всеми этапами ТП изготовления. Исключения могут составлять этапы изготовления ПТЧЭ, на которых необходимо придать поверхностям пластин особые свойства, для использования их на последующих операциях. В этом случае проводится оптимизация вышеуказанной последовательности в части изменения режимов, добавления или исключения некоторых переходов и т.д., однако общая последовательность комплексов операций остается неизменной.

3.3. Окисление

Слой двуокиси кремния, получаемый в процессе окисления, играет большую роль в технологии изготовления ПТЧЭ датчиков давлений. Высокие физико-химические свойства слоев двуокиси кремния, полученных на его поверхности, определили их широкое применение в технологии изготовления ПТЧЭ. Это обусловлено тем, что двуокись кремния:

- обладает хорошими диэлектрическими и пассивирующими качествами, заключающимися в стабилизации свойств поверхности после травления, обеспечивая низкий заряд границы раздела Si-SiO₂;
- образует равномерное, сплошное и прочное покрытие поверхности монокристаллического кремния, допускает строгий контроль толщины пленки;
- обладает маскирующими свойствами для бора и фосфора, являющимися наиболее распространенными примесями для легирования кремния;
- при определенных условиях может служить источником примеси, вводимой путем высокотемпературной диффузии.

В соответствии с этим можно выделить следующие основные функции двуокиси кремния в составе ПТЧЭ датчиков давлений:

- диэлектрический слой;
- защитный (пассивирующий) слой (см. рис. 3.1, 4);
- маскирующая пленка (см. рис. 3.1, 2).

При этом технология получения двуокиси кремния не имеет принципиальных различий в зависимости от функционального назначения формируемых слоев и в общем случае заключается в высокотемпературном окислении в парах воды, в атмосфере сухого или влажного кислорода (рис. 3.3) [56].

Окисление кремния начинается с реакции взаимодействия его поверхностных атомов с молекулами или молекулярными ионами окислителя, в результате которого на поверхности образуется устойчивый монослой двуокиси кремния. Эксперименты показывают, что энергия связи адсорбированных молекул составляет около 970 кДж/моль, что близко к теплоте образования двуокиси кремния (840 кДж/моль). После образования монослоя окисла характер взаимодействия изменяется, дальнейшая адсорбция окислителя замедляется или прекращается совсем. Механизм дальнейшего роста окисной пленки еще не выяснен. Существует несколько теорий процесса роста, но ни одну из них нельзя полностью принять или отвергнуть.

Наиболее часто для описания роста тонких слоев двуокиси кремния пользуются теорией Кабрера-Мотта. По этой теории при

адсорбции частиц окислителя происходит передача электронов от поверхности атомов кремния к окислителю, например кислороду. При этом поверхность, потерявшая электроны, заряжается положительно, а молекулы кислорода – отрицательно.

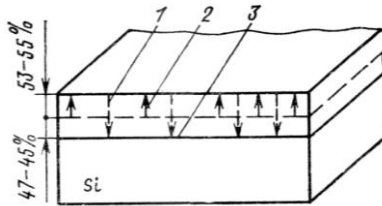


Рис. 3.3. Рост слоя SiO_2 на монокристаллической пластине кремния:

1 – направление диффузии окислителя;
2 – направление роста слоя SiO_2 ; 3 – граница раздела Si-SiO_2

Таким образом, на поверхности образуется двойной электрический слой из отрицательно заряженных молекул окислителя и положительного заряда приповерхностного слоя кремния. Поскольку расстояние между ними мало, образуется сильное электрическое поле порядка 10^8 - 10^9 В/м. Столь значительная напряженность электрического поля создает условия для перемещения положительных ионов кремния на поверхность образовавшегося слоя окисла либо отрицательных ионов окислителя к поверхности кремния и образованию нового слоя окисла.

Экспериментально установлено, что внешнее электрическое поле, приложенное перпендикулярно поверхности кремния, влияет на скорость окисления. Оно ускоряет окисление в том случае, если на границе кремний-окисел кремний находится при более положительном потенциале, чем граница окисел-газ. Это говорит о том, что в данном случае диффундируют ионы окислителя через слой двуокиси кремния.

По мере роста толщины окисной пленки переходу ионов начинают препятствовать ионы образовавшейся двуокиси кремния и стадия формирования окисной пленки прекращается при достижении ею толщины порядка десятка атомных слоев.

Описанный выше механизм обуславливает появление тонкого окисного слоя на поверхности кремния, находящегося при комнатной температуре на воздухе или в атмосфере кислорода.

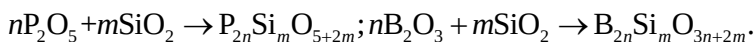
Толщина слоя кремния, израсходованного на создание слоя двуокиси, составляет около 47 % толщины окисла, так как:

$$\frac{A_{\text{Si}} \cdot 100}{M_{\text{SiO}_2}} \approx 47\%,$$

где A_{Si} – атомная масса кремния;

M_{SiO_2} – молекулярная масса двуокиси кремния.

Так как молекулярный объем у кристаллической двуокиси кремния примерно в 2,2 раза больше, чем у кремния, то окисление приводит к созданию на поверхности кремния плотного защитного окисного слоя. При диффузии примесей, таких как бор или фосфор, через слой окисла образуется смешанная вязкая стеклообразная фаза – примесно-силикатное стекло. Состав этой фазы зависит от концентрации в ней примеси и коэффициента распределения примеси между фазами. Окисел диффундирующего вещества, достигающий границы раздела стекло-окисел, вступает в реакцию с последним:



Таким образом, рост толщины стеклообразной фазы определяется наличием двух процессов – диффузии примеси к поверхности раздела стекло-окисел и ее реакцией с двуокисью кремния.

Последующие частицы примеси диффундируют через образовавшийся слой примесно-силикатного стекла и при достижении границы стекло-окисел реагируют с окисью, образуя новый слой стекла.

Под действием градиента концентрации примесь диффундирует в окисел с коэффициентом диффузии D_{SiO_2} , зависящим от природы диффузанта и свойств окисла. Экспериментальные результаты показывают, что коэффициент диффузии примеси в окисле значительно меньше, чем в

примесно-силикатном стекле. Этот факт, вероятно, связан с различием в физической природе примесно-силикатного стекла и окисла и в первую очередь определяется прочностью химических связей, которые в стекле значительно меньше, чем в окисле.

Между стеклообразной фазой и слоем двуокиси кремния существует четкая граница раздела, которая перемещается к границе раздела окисел-кремний. Скорость ее перемещения зависит от концентрации примеси и температуры. Практически диффузия бора или фосфора в кремний не идет до тех пор, пока примесно-силикатное стекло не достигнет поверхности кремния. Достигнув поверхности кремния, примесь перераспределяется между стеклом и кремнием в соответствии с коэффициентом распределения и далее диффундирует в кремний (рис. 3.4).

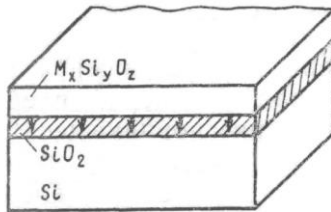


Рис. 3.4. Образование примесно-силикатного стекла и направление его роста

Таким образом, маскирующие свойства пленки окисла кремния определяются двумя взаимосвязанными процессами – ростом слоя окисла, увеличением толщины слоя примесно-силикатного стекла в нем и собственно диффузией примеси в системе двух фаз окисел-кремний.

Эффективность маскирования зависит от толщины пленки окисла, температуры и времени диффузии, давления паров примесей и их концентрации, но определяющим параметром является отношение коэффициентов диффузии примеси в окисле кремния и в исходном кремнии (табл. 3.1), т. е. маскирование кремния достигается тогда, когда [24]:

$$\frac{D_{\text{SiO}_2}}{D_{\text{Si}}} \ll 1,$$

где D_{Si} , D_{SiO_2} – коэффициент диффузии в кремнии и двуокиси кремния соответственно.

Таблица 3.1

Элемент	Коэффициент диффузии в кремнии, м ² /с	Коэффициент диффузии в двуокиси кремния, м ² /с	Температура, °С
P	$4 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-18}$	1200
B	$4 \cdot 10^{-16}$	$3,9 \cdot 10^{-17}$	1100
Sb	$2 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-17}$	1100
As	$3 \cdot 10^{-16}$	$3,5 \cdot 10^{-16}$	1200
Ga	$4 \cdot 10^{-16}$	$5,3 \cdot 10^{-15}$	1100
Al	$2,3 \cdot 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{-13}$	1250

Примечание – Значения коэффициентов диффузии в кремнии более подробно представлены на рисунке 3.14.

Двуокись кремния, например, не защищает от диффузии галлия, т. к. для этой примеси:

$$\frac{D_{\text{SiO}_2}}{D_{\text{Si}}} \gg 1.$$

Высокая температура термического окисления приводит к нежелательной разгонке примеси в уже созданных диффузионных слоях, к перераспределению примеси между кремнием и его окислом.

Одним из важнейших параметров, влияющих на характер перераспределения примеси, кроме отношения коэффициентов диффузии, является коэффициент перераспределения (сегрегации), который определяется как отношение равновесных концентраций примесей в кремнии и его окисле:

$$k = \frac{N_{\text{Si}}}{N_{\text{SiO}_2}}.$$

Реальный процесс перераспределения примеси зависит также от скорости роста слоя окисла и условий его роста, определяемого соотношением:

$$r = \frac{\sqrt{B}}{\sqrt{D_{\text{Si}}}},$$

где B – константа параболического роста окисной пленки.

Это отношение определяет степень перераспределения примеси на границе раздела окисел – кремний. Поскольку D_{Si} является функцией температуры, а B – температуры и условий окисления, например влажности, то очевидно, что с помощью изменения условий окисления можно регулировать степень перераспределения примеси.

Термически выращенная двуокись кремния неоднородна по своему составу, который изменяется в зависимости от условий предыдущей обработки окисляемых пластин и структур с p - n переходами, условий их хранения и чистоты поверхности. Свойства окисла кремния зависят также от наличия посторонних примесей на поверхности окисляемых пластин и от примесей, захваченных растущим окислом из окружающей атмосферы. В термически выращенном окисле имеются ионы щелочных металлов, источником которых являются кварц, керамические муфели и футеровка диффузионных печей. Ионы щелочных металлов, обладающие сравнительно высокой подвижностью в окисле, при наличии достаточно сильных электрических полей, возникающих в p - n переходе, мигрируют к границе раздела двуокись кремния-кремний, вызывая нестабильность параметров ПТЧЭ. Существенным недостатком термически выращенного окисла является его гидратация при хранении, если не приняты соответствующие меры предосторожности. По степени гидратации двуокись кремния может иметь целый ряд состояний от почти безводной стеклообразной пленки до гелеобразного состояния, содержащего до 100 частей воды на одну часть SiO_2 , из-за чего резко ухудшается адгезия фоторезиста к слою окисла (см. п. 3.4). Тем не менее, указанные выше недостатки возможно исключить, либо уменьшить специальными методами. Например, строго соблюдая технологические режимы

формирования термического окисла, возможно значительно уменьшить влияние ионов щелочных металлов на свойства SiO_2 [3, 27, 33], а предварительная сушка пластин перед нанесением слоя фоторезиста позволяет удалить гидрофильный адсорбированный слой на поверхности пластины и повысить адгезию фоторезиста (см. п. 3.4). А электрические свойства термически выращенной двуокиси кремния остаются непревзойденными и по сей день [33]. Поэтому не случайно формирование слоев двуокиси кремния при производстве ПТЧЭ датчиков давлений рекомендуется использовать термические процессы [30].

Рассмотрим механизм образования толстых слоев окисла кремния, наиболее обоснованная интерпретация которого имеет экспериментальное подтверждение. Термическое окисление кремния, как правило, производится при давлениях, близких к атмосферному, и концентрация адсорбированных на поверхности кремния молекул окислителя N_1 пропорциональна давлению газа или паров воды при отсутствии ассоциации или диссоциации окислителя на поверхности (рис. 3.4).

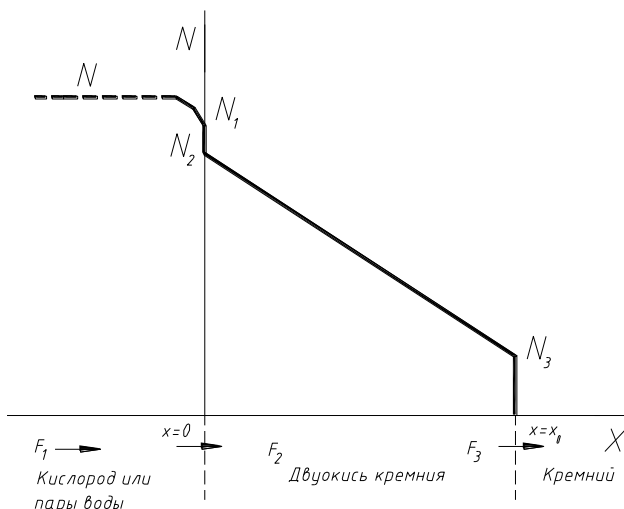


Рис. 3.4. Распределение концентрации окислителя в установившемся процессе окисления

Адсорбированный на поверхности окислитель проникает в слой имеющегося на ней окисла, диффундирует в нем, создавая на границе раздела окисел-кремний концентрацию N_3 .

На границе раздела фаз окисел-кремний молекулы окислителя вступают в реакцию с атомами кремния, в результате чего увеличивается толщина окисного слоя до $x=x_0$. При этом предполагается, что в установившемся процессе окисления на границе раздела фаз отсутствует накопление молекул окислителя.

Очевидно, что поток окислителя из одной среды в другую возникает только в том случае, если существует градиент концентрации, т. е. имеет место разность концентраций на границах фаз. Пусть в слое окисла на границе с окружающей средой концентрация молекул окислителя равна N_2 . При этом следует иметь в виду, что в концентрацию окислителя в окисном слое N_2 и N_3 не входит концентрация окислителя, уже вступившего в реакцию с кремнием и образовавшего соединение SiO_2 .

Поток окислителя F_1 из газовой среды к поверхности окисла:

$$F_1 = h(N_1 - N_2), \quad (3.4)$$

где h – коэффициент переноса окислителя к поверхности.

Поток окислителя внутри слоя двуокиси кремния определяется диффузией и пропорционален градиенту концентрации и коэффициенту диффузии. В установившемся процессе диффузии накопления частиц окислителя на границах фаз нет и поток окислителя в любой точке слоя окисла одинаков и равен:

$$F_2 = D_{\text{эф}} \frac{N_2 - N_3}{x}, \quad (3.5)$$

где x – толщина слоя окисла в любой момент времени; $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии.

Необходимо напомнить, что, поскольку диффузия окислителя в слое окисла происходит не только под действием градиента концентрации, но вследствие дрейфа в электрическом поле, созданном объемным зарядом, эффективный коэффициент диффузии примерно в 2 раза выше обычного коэффициента диффузии.

Поток окислителя, вступающего в реакцию с кремнием, пропорционален концентрации окислителя на границе раздела с кремнием:

$$F_3 = kN_3, \quad (3.6)$$

где k – константа скорости химической реакции окисления.

В установившемся режиме процесса окисления все рассмотренные потоки равны, т. е.

$$F_1 = F_2 = F_3.$$

Приравнивая уравнения (3.4) и (3.6), а также (3.5) и (3.6), имеем:

$$\frac{h}{k}N_1 - \frac{h}{k}N_2 = N_3; \quad (3.7)$$

$$\frac{D_{эф}N_2}{kx} - \frac{D_{эф}N_3}{kx} = N_3. \quad (3.8)$$

Заменяя в (3.8) N_3 его значение из (3.7), после несложных преобразований получим:

$$N_2 \left(\frac{D_{эф}}{xh} + \frac{D_{эф}}{kx} + 1 \right) = N_1 \left(1 + \frac{D_{эф}}{kx} \right).$$

Разделив правую и левую части равенства на $D_{эф}/kx$, получим:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1 + \frac{kx}{D_{эф}}}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kx}{D_{эф}}}. \quad (3.9)$$

Для определения концентрации N_2 используем уравнение (3.8), откуда и определим ее значение. Последнее поставим в (3.9), и после несложных преобразований получим:

$$\frac{N_3}{N_1} = \frac{1}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kx}{D_{эф}}}. \quad (3.10)$$

Рассмотрим два предельных случая.

1 $D_{эф} \rightarrow 0$, тогда из уравнения (3.9) следует, что $N_2 \rightarrow N_1$, а из уравнения (1.10) $N_3 \rightarrow 0$, т.е. окисление отсутствует и процесс определяется диффузией окислителя.

2 $D_{эф} \rightarrow \infty$, из уравнения (3.9) и (3.10) следует, что:

$$N_2 = N_3 = \frac{N_1 h}{R + h}, \quad (3.11)$$

т. е. процесс определяется константой скорости химической реакции. Если в уравнение (3.6) подставить значения из (3.11), то поток:

$$F_3 = \frac{k N_1}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kx}{D_{эф}}}. \quad (3.12)$$

Допустим, что на образование единицы объема окисла идет N частиц окислителя; тогда скорость роста будет определяться уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{F_3}{N} = \frac{k \frac{N_1}{N}}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kx}{D_{эф}}}. \quad (3.13)$$

Поскольку N – число молекул окислителя и в 1 см^3 имеется $2,2 \cdot 10^{22}$ молекул, то в случае окисления в атмосфере кислорода требуется $2,2 \cdot 10^{22}$ молекул кислорода, а при окислении в парах воды – вдвое больше, т. е. $4,4 \cdot 10^{22}$ молекул окислителя. (Молярная масса SiO_2 $\mu = 60 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, плотность $d = 2200 \text{ кг/м}^3$, следовательно, 1 моль SiO_2 занимает объем $27,2 \text{ см}^3$. В этом объеме содержится $6,02 \cdot 10^{23}$, а в 1 см^3 $N = \frac{N_a}{V} = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{27,2} = 2,2 \cdot 10^{22}$ молекул).

При этом необходимо помнить, что окисление идет при наличии слоя окисла толщиной $x = x_0$, образовавшейся при комнатной температуре, и по другому механизму, например по механизму Кабрера-Мотта, так как только при наличии слоя окисла имеет место диффузия окислителя и имеет смысл

формула (3.5). Таким образом, начальные условия окисления при высокотемпературном окислении:

$$x=x_0, \text{ при } t=0.$$

Разделим числитель и знаменатель в (3.13) на k и приведем к общему знаменателю относительно $D_{\text{эф}}$, тогда:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{D_{\text{эф}} \frac{N_1}{N}}{D_{\text{эф}} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right) + x}. \quad (3.14)$$

Обозначим

$$2D_{\text{эф}} \frac{N}{N_1} = B \quad \text{и} \quad 2D_{\text{эф}} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right) = A. \quad (3.15)$$

После замены в (3.14) последнее перепишем в виде

$$\frac{dx}{dt} = \frac{B}{A + 2x},$$

или

$$(2x + A)dx = Bdt.$$

Проинтегрируем левую часть в пределах от x до x_0 , а правую часть от 0 до t :

$$x^2 + Ax - B(x_0^2 + Ax_0) = Bt.$$

Обозначим

$$\frac{x_0^2 + Ax_0}{B} = t_0,$$

тогда будем иметь

$$x^2 + Ax - B(t + t_0) = 0, \quad (3.16)$$

где t_0 – смещение по оси времени, показывающее начальную толщину слоя окисла.

Решая относительно x квадратное уравнение (3.16) и отбрасывая отрицательный корень как не имеющий физического смысла, получаем:

$$x = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + B(t + t_0)}.$$

Умножив правую и левую части этого равенства на $2/A$, приведем его к виду, удобному для анализа:

$$\frac{x}{A/2} = \left[1 + \frac{t + t_0}{A^2 / 4B} \right]^{1/2} - 1. \quad (3.17)$$

Рассмотрим два предельных случая:

1 Время окисления велико, т. е. $t \gg A^2/4B$. Тогда, пренебрегая единицей и t_0 , получим:

$$x^2 = Bt. \quad (3.18)$$

Поскольку $B = 2D_{\text{эф}}N_1/N$, то очевидно, что скорость окисления при больших временах протекания процесса определяется количеством окислителя у границы раздела газ (пар) – окисел и коэффициентом диффузии $D_{\text{эф}}$, т. е. ход процесса контролируется диффузией. Коэффициент B называется константой параболического роста.

2 При малых временах окисления, когда $t \ll A^2/4B$, правую часть уравнения (3.17) можно разложить в ряд, и, ограничиваясь первым членом разложения, получим:

$$\frac{x}{A/2} = 1 + \frac{t + t_0}{2A^2 / 4B} - 1.$$

Подставляя значения A и B из (3.17) и проведя некоторые сокращения, имеем:

$$x = \frac{N_1 kh}{N(k + h)}(t + t_0). \quad (3.19)$$

Величина $\frac{N_1 kh}{N(k+h)} = K$ получила название константы линейного роста, и тогда:

$$x = K(t + t_0). \quad (3.20)$$

Таким образом, при малых временах окисления процесс описывается линейным законом и определяется скоростью переноса k на поверхности кремния. Скорость всего процесса меньше скорости переноса, а так как, по экспериментальным данным, $h \gg k$ при $T=1000^\circ\text{C}$, то $kh/(k+h) \approx K$ и из (3.15) $A \approx N_1 k/N$, т. е. вначале высокотемпературного окисления скорость роста окисла ограничивается константой скорости химической реакции на границе раздела окисел-кремний.

Пользуясь уравнением (3.16), можно рассчитывать зависимость $x/(A/2)$ от $(t+t_0)/(A^2/4B)$, которая представлена на рисунке 3.5.

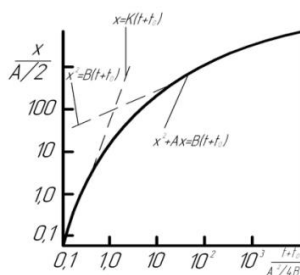


Рис. 3.5. Зависимость толщины слоя окисла от времени окисления

Экспериментальная проверка показала, что уравнение (3.16) дает полное и точное описание процесса окисления в широком диапазоне температур и в различных атмосферах (сухой или влажной, кислород или пары воды). Отсутствие резкого перегиба на кривой свидетельствует о том, что преобладание одного механизма окисления над другим не наступает резко при определенной температуре, а постепенно изменяется с ростом температуры. Штриховыми линиями показаны линейная и параболическая аппроксимация этой зависимости.

3.3.1. Окисление кремния в атмосфере сухого или влажного кислорода

Установка для окисления кремния в атмосфере сухого или влажного кислорода представляет собой не что иное, как

установку для диффузии в потоке газа-носителя, которая имеет зону с постоянной рабочей температурой для всех окисляемых пластин (см. п. 3.5.3).

Для осушения кислорода применяется вымораживающая ловушка или химические поглотители влаги, обеспечивающие точку росы кислорода до минус 60 °С и ниже. Для удаления частиц с размером более 0,5 мкм применяют специальные фильтры. Окисление кремния осуществляется при температурах от 1100 до 1200 °С, которые поддерживаются с точностью ± 5 °С. Повышение температуры выше 1200 °С не приводит к возрастанию скорости окисления, но зато ухудшает характеристики нанесенного слоя SiO_2 , т. к. увеличиваются нарушения сплошности пленки, и уменьшается ее электрическая прочность.

При окислении в сухом кислороде нарастает достаточно прочная пленка. Скорость ее роста весьма мала, а толщина не превышает 0,6–0,8 мкм, но для выращивания пленки и такой толщины требуется около 10–15 ч при 1200 °С. Это объясняется тем, что при окислении в сухом кислороде диффундируют молекулярные ионы O_2^- и диффузия продолжается до тех пор, пока толщина окисла не станет значительно больше, чем толщина слоя объемного заряда.

Установка для окисления во влажном кислороде представляет собой аналогичную систему, что и для окисления в сухом кислороде, а увлажнение последнего осуществляется его пропусканием через водяную баню с деионизованной водой. Содержание влаги в кислороде определяется температурой воды и скоростью потока кислорода в камере окисления.

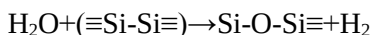
Основное отличие окисления во влажном кислороде от процесса, протекающего в сухом кислороде, заключается в том, что в первом случае можно легко изменять концентрацию окислителя. Содержание влаги в потоке газа-носителя является наиболее важным фактором, обуславливающим скорость окисления при заданных значениях времени и температуры.

Замена кислорода инертными газами практически не влияет на скорость роста окисла. Это свидетельствует о том, что в данном случае рост окисла происходит за счет кислорода, входящего в состав паров воды. При данном методе окисления

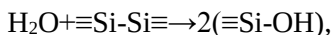
можно варьировать скорость роста окисла от скорости, соответствующей окислению в атмосфере сухого кислорода, до скорости роста, соответствующей скорости окисления в парах воды. Поэтому наиболее удобным режимом окисления является следующий порядок операций: предварительное окисление в сухом кислороде, длительное окисление во влажном кислороде, а затем формовка окисла в сухом кислороде. Первая операция дает прочную пленку, но очень малой толщины, обработка в среде влажного кислорода дает довольно быстрый рост пленки и получение необходимой ее толщины, но плотность ее получается недостаточной. При окончательной ее обработке в среде сухого кислорода рост окисла незначителен, но зато происходит формовка, в результате которой происходят уплотнения пленки окисла и улучшение ее структуры.

3.3.2. Окисление кремния в парах воды

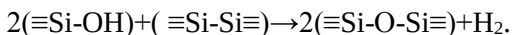
При окислении в парах воды предполагается, что после образования первоначального окисла, препятствующего дальнейшему контакту воды с кремнием, реакция идет между поверхностными атомами кремния и молекулами воды, находящимися в окисле:



либо между силанольной группой и кремнием. В этом случае протекают следующие реакции: на границе раздела пар-окисел:



а на границе окисел-кремний:



Водород, образующийся при этих реакциях, очень быстро диффундирует от границы раздела кремний-окисел к границе раздела окисел-пар, но может и вступать во взаимодействие с силоксановыми группами с образованием силанольных групп (Коэффициент диффузии водорода в кварцевом стекле при 1050 °С $D_{\text{H}_2} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, что значительно больше

коэффициента диффузии воды в этом стекле при той же температуре, когда $D_{H_2O} = 9,5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$).

Высокотемпературную реакцию кремния с водяными парами называют окислением в парах воды только в том случае, если количество пара не ограничивает скорость реакции. Установка для окисления представляет собой диффузионную печь, через которую пропускается поток водяных паров из специального нагреваемого сосуда, в котором содержится высокоомная деионизованная вода. Магистралы, подводящие пар в зону окисления, должны подогреваться во избежание его конденсации на стенках, если источник пара находится на значительном удалении от печи. Температура воды (102 °C) не оказывает существенного влияния на процесс окисления при условии, что она является достаточной для поддержания парциального давления паров воды у поверхности кремния около 0,1 МПа. Установлено, что с повышением температуры воды увеличивается скорость потока пара над окисляемыми пластинами, а его концентрация существенно не меняется.

Окисления в парах воды проходит с самой высокой скоростью роста окисной пленки по сравнению с другими методами термического окисления. Однако этот процесс имеет меньшую воспроизводимость результатов, а полученные пленки менее совершенны по сравнению с пленками, выращенными в атмосфере влажного или сухого кислорода.

Экспериментальные исследования показали, что последовательное окисление в сухом и влажном кислороде, а также в парах воды происходит таким образом, что как будто бы процесс окисления не прекращался. Поэтому для получения пленки окисла, надежно маскирующий кремний, можно проводить последовательное окисление в потоке водяного пара, а затем в потоке кислорода. При этом наиболее важным является второй этап, в процессе которого из окисла удаляется вода. Освободившееся после испарения воды пространство в процессе окисления в атмосфере сухого кислорода заполняется за счет спекания и рекристаллизации. С этой целью время, в течение которого производится окисление в атмосфере сухого кислорода, выбирается достаточным для удаления воды и заравнивания дефектов в слое окисла.

Зависимость толщины слоя двуокиси кремния от времени термического окисления в сухом и влажном кислороде показаны на рис. 3.6 и 3.7 соответственно [30].

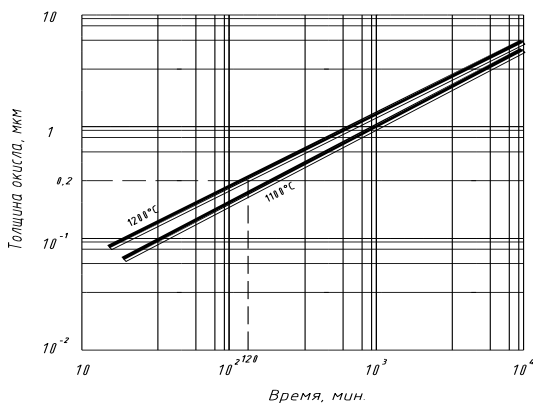


Рис. 3.6. Зависимость толщины выращиваемого в сухом кислороде окисла от времени термического окисления

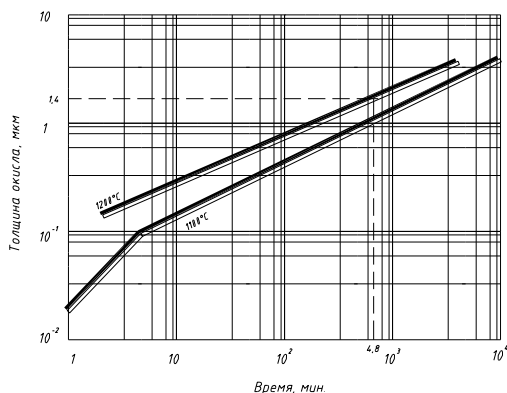


Рис. 3.7. Зависимость толщины выращиваемого в атмосфере водяного пара окисла от времени термического окисления

Равновесную концентрацию частиц окислителя N_1 на поверхности SiO_2 можно вычислить из уравнения (3.15), если взять экспериментальные значения $D_{\text{эф}}$ и B , которые берутся при одинаковой температуре, и по величине N . Уже отмечалось

выше, что концентрация молекул окислителя N , необходимая для образования единицы объема окиси кремния, составляет $2,2 \cdot 10^{28}$ при сухом кислороде и $4,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ для паров воды. Коэффициент диффузии для них при 1000°C составляет $D_{\text{ф}} = 5,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ и $D_{\text{эф}} = 8,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно. Несмотря на то, что коэффициент диффузии воды мал, растворимость ее в двуокиси кремния велика.

Значение N_1 , рассчитанное указанным способом для нормального давления, составляет $5,2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ для сухого кислорода, $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ для паров воды. Таким образом, большая скорость окисления в парах воды обусловлена не большей скоростью диффузии, а вызвана большим значением поверхностной концентрации окислителя и высокой растворимостью воды в слое двуокиси кремния.

3.4. Фотолитография

Литографические процессы основаны на использовании высокомолекулярных соединений, называемых резистами и обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного вида излучений. При фотолитографии применяют ультрафиолетовое излучение, при рентгенолучевой литографии – рентгеновское, а при электронолитографии – поток электронов. В дальнейшем под литографией мы будем понимать фотолитографию, как наиболее часто используемую для формирования ПТЧЭ датчиков давлений.

С помощью фотолитографии в пленочных слоях или непосредственно на подложках создают по заданным рисункам высокоточные топологии будущих ПТЧЭ. Топология может быть сформирована в диэлектрических (SiO_2 , Si_3N_4), металлических (Al , Cu , Au , Ni) или полупроводниковых (Si , Ge).

Весь процесс фотолитографии в общем случае состоит из следующей последовательности операций (рис. 3.8) (см. также рис. 3.1, в):

- нанесение слоя фоторезиста на планарную сторону пластины (на маскирующий слой двуокиси кремния) (см. рис. 3.8, а);
- сушка фоторезиста;
- совмещение и экспонирование (см. рис. 3.8, б);
- проявление фоторезиста (см. рис. 3.8, в);

- задубливание фоторезиста;
- нанесение защитного слоя лака на непланарную сторону пластины (см. рис. 3.8, з);
- травление по формированию окон в маскирующем слое двуокиси кремния (см. рис. 3.8, д);
- снятие защитного слоя лака на непланарной стороне пластины (см. рис. 3.8, е);
- удаление слоя фоторезиста (см. рис. 3.8, ж).

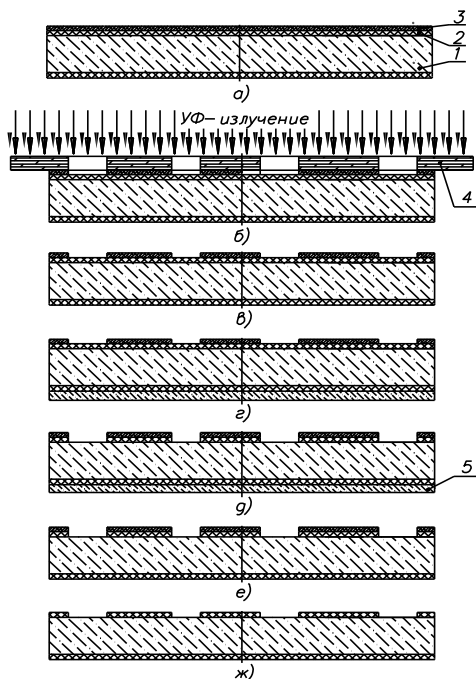


Рис. 3.8. Процесс фотолитографии:

1 – подложка; 2 – слой двуокиси кремния; 3 – слой фоторезиста; 4 – фотошаблон; 5 – защитный слой лака

Приведенная последовательность относится к формированию окон в маскирующем слое двуокиси кремния на планарной стороне пластины (см. рис. 3.1, в) (наиболее типичный случай при изготовлении ПТЧЭ датчиков давлений); для формирования окон в других слоях, в т. ч. двух и более, а также с

двух сторон пластины, необходимо добавлять или исключать отдельные операции из вышеприведенной последовательности, но общая концепция построения процесса фотолитографии будет оставаться неизменной.

Предварительно нанесенный на поверхность светочувствительный материал (фоторезист) подвергают воздействию ультрафиолетового излучения, то есть экспонируют через специальную стеклянную маску – фотошаблон, имеющий прозрачные и непрозрачные участки. Под воздействием излучения свойства фоторезиста изменяются и при последующей обработке в специальных химических реактивах, т. е. проявлении, отдельные участки слоя фоторезиста удаляются. Негативным фоторезистом называется фоторезист, который не растворяется и не удаляется с участков, на которые воздействовало ультрафиолетовое излучение, а позитивным – фоторезист, который растворяется и удаляется.

Свойства фоторезистов характеризуют рядом параметров.

Светочувствительность – это способность фоторезиста изменять свои свойства под действием светового излучения. Светочувствительность фоторезистов зависит от их физико-химических свойств и тем больше, чем меньше экспозиция:

$$S=1/Et=1/H,$$

где E – энергооблученность, Вт/см²; t – длительность облучения (выдержка), с; H – экспозиция, Вт·с/см².

Необходимо, чтобы спектр излучения источника совпадал со спектром поглощения фоторезиста. Большинство фоторезистов обладает максимальной светочувствительностью в ультрафиолетовой области спектра, то есть в диапазоне длин волн 300–500 нм.

Разрешающая способность – это максимально возможное количество линий, разделенных промежутками такой же ширины на 1 мм поверхности, которое может быть воспроизведено в слое фоторезиста:

$$R=1000/2l,$$

где R – разрешающая способность, лин/мм; l – ширина линии (промежутка), мкм.

Иногда R – это наименьший размер элемента в микрометрах.

Различают разрешающие способности фоторезиста R_p и процесса фотолитографии R_ϕ . Так, если $R_p \approx 1000$ лин/мм, то $R_\phi \approx 400$ лин/мм, что объясняется отклонением световых лучей в системе фотошаблон-фоторезист-подложка из-за дифракции, рассеяния на границах зерен фоторезиста и отражения от поверхности подложки. Эти явления приводят к боковому засвечиванию, формированию размытого края и снижению разрешающей способности. Еще в большей степени R_ϕ уменьшается в результате бокового подтравливания x под слоем фоторезиста на границах защитного рельефа при травлении пленки двуокиси кремния толщиной h (рис. 3.9).

С увеличением толщины слоя фоторезиста R_ϕ уменьшается. Кроме того, R_ϕ зависит от совершенства применяемых фотошаблонов и источников ультрафиолетового излучения.

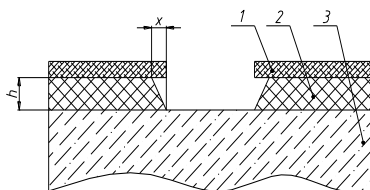


Рис. 3.9. Боковое подтравливание пленки двуокиси кремния:

1 – слой фоторезиста; 2 – слой двуокиси кремния;

3 – кремниевая подложка

Кислотостойкость – это способность фоторезиста противостоять воздействию кислот (HF , HNO_3 , HCl и др.), а в некоторых случаях и щелочей (KOH , NaOH и др.). Так как единого метода определения кислотостойкости фоторезистов нет, ее обычно характеризуют временем, в течение которого они выдерживают воздействие определенных химических реактивов. Кислотостойкость зависит также от состава полимерной основы фоторезиста. Например, желатин, гуммиарабик и шеллак имеют низкую кислотостойкость, а эпоксидные смолы, каучуки – высокую и позволяют проводить «глубинное» травление кремния (до 100 мкм). Кроме того, кислотостойкость зависит от

адгезии, толщины и качества слоя фоторезиста (отсутствия пустот, трещин, пор и др.) и определяется по формуле:

$$k=h/x,$$

где h – толщина слоя двуокиси кремния; x – боковое подтравливание.

При $k \approx 1$ травление качественное, а при $k > 1$ – некачественное.

Выпускаемые в настоящее время фоторезисты обеспечивают при толщине слоя от 0,45 до 8 мкм формирование линий шириной от 0,5 до 20 мкм. В табл. 3.2 представлены некоторые технологические характеристики позитивных и негативных фоторезистов [48].

Таблица 3.2

Сравниваемые характеристики	Фоторезист	
	Негативный	Позитивный
Влияние Экспонирования	Достаточная полимеризация для формирования рисунка	Химическая стойкость резиста, формирующего рисунок, химические изменения происходят в областях, не участвующих в формировании резистивной маски
Чувствительность к кислороду	Чувствителен, что создает трудности при экспонировании	Не чувствителен
Удаление фоторезиста	Трудно удаляется, т. к. материал имеет высокую относительную молекулярную массу	Легко удаляется, т. к. не содержит компонентов с высокой молекулярной массой
Химическая стойкость	Незначительная химическая стойкость, низкая скорость фильтрации	Высокая химическая стойкость и скорость фильтрации
Проявление	Проявитель – органический растворитель; рисунок набухает; удаление отходов затруднено	Проявитель на основе воды; рисунок не нарушается; удаление отходов простое

Продолжение таблицы 3.2.

Толщина фоторезиста	Должна составлять не более 1/3 минимального размера рисунка	Может быть равна минимальному размеру рисунка или превышать его
Покрытие фоторезистом ступенек рельефа	Плохое из-за ограничений по толщине покрытия	Отличное, так как можно использовать относительно толстое покрытие (2–3 мкм)

Далее более подробно остановимся на каждой операции из вышеприведенной последовательности процесса фотолитографии (см. рис. 3.8) на примере использования позитивных фоторезистов, в отличие от негативных, нашедших более широкое применение.

Нанесение фоторезиста является одной из важнейших операций. От качества ее выполнения и толщины нанесенного слоя фоторезиста зависят его разрешающая способность, кислотостойкость и адгезия, а также воспроизводимость геометрических размеров элементов изготавливаемых ПТЧЭ.

Предварительная обработка поверхности подложек необходима для хорошей адгезии, что в свою очередь обеспечивает минимальное боковое растравливание материала при передаче изображения на подложку.

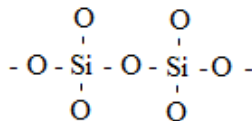
Адгезионные силы пленки фоторезиста возрастают с увеличением степени смачивания, т. е. при стремлении к нулю краевого угла смачивания подложки фоторезистом. Степень бокового растравливания материала при передаче изображения на подложку зависит от диффузии травителя по границе раздела фоторезист-подложка, которая ускоряется с ростом смачиваемости поверхности последними растворами травителя. Определяющим фактором в данном случае является гидрофильность поверхности твердого тела, качественной характеристикой которой служит краевой угол смачивания воды θ_c . С увеличением гидрофильности твердой поверхности, т. е. с уменьшением θ_c , создаются благоприятные условия для проникновения травителя по границе раздела фоторезист-подложка. В результате этого происходит растравливание защищенных фоторезистом пограничных участков подложки.

Контакт между фоторезистом и подложкой, необходимый для обеспечения хорошей адгезии, зависит также от степени загрязнения поверхности. Поверхностные загрязнения – такие, как пыль, масла, адсорбированные газы, ионы легирующих примесей, могут создавать области слабой адгезии. Поэтому очистка поверхности перед нанесением фоторезиста является важной предпосылкой для обеспечения адгезии фоторезистивных пленок.

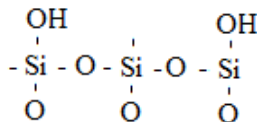
Необходимо отметить также роль класса шероховатости поверхности для получения хорошей адгезии: чем глубже микротрещины на поверхности, тем труднее удалить окклюдированный воздух, который создает области слабой адгезии.

Для основных типов поверхностей (кремний, диэлектрики-окисные пленки, примесно-силикатные стекла и металлы) характер обработки существенно различается. Для кремния заметного различия не наблюдается при проведении фотолитографии на гидрофильной или гидрофобной поверхности.

В технологии изготовления ПТЧЭ 70–80 % фотолитографических процессов проводятся на пленках двуокиси кремния или примесно-силикатных стекол. Чистая окисная пленка состоит из силоксановых групп



Связи кремния насыщаются с поверхности гидроксильными группами, и структура пленки приобретает вид



где (Si–OH) – силанольная группа.

Окисные пленки, только что извлеченные из печи термического окисления, гидрофобны, почти не содержат

гидроксильных групп, но присоединяют их при небольшой выдержке на воздухе. Гидроксильные группы могут содержаться в самой пленке окисла, при окислении в парах воды. В отличие от кремния качество фотолитографии на окисле в значительной мере зависит от того, является поверхность окисла гидрофильной или гидрофобной. Непосредственно адгезию фоторезиста к окислу определить крайне трудно, но можно судить о ней по клину, возникающему после травления. Малый клин травления достигается только на гидрофобных окислах.

Предварительную оценку качества фотолитографии можно произвести, измеряя угол смачивания окисла Θ_c каплей воды. При значениях Θ_c не более 35° клин травления резко возрастает. Минимальное значение (около 1 мкм) клина травления достигается при значениях Θ_c в интервале от 49 до 63° . Если окисел подвергнут гидрофилизирующей обработке – кипячению в азотной кислоте или воде, то Θ_c уменьшается, а качество фотолитографии ухудшается и, наоборот, термообработка окисла перед нанесением фоторезиста способствует улучшению результатов фотолитографии.

Чаще всего фоторезист наносят центрифугированием, помещая подложки в центре платформы центрифуги и прижимая их вакуумным присосом. При вращении платформы слой нанесенного на подложки фоторезиста равномерно распределяется по их поверхности. В зависимости от вязкости фоторезиста и частоты вращения центрифуги (500–8000 об/мин) обычно за 20–30 с формируется слой фоторезиста толщиной 0,5–20 мкм.

Вообще, зависимость толщины пленки от скорости вращения центрифуги определяется как

$$h_{\phi} = \text{const} / w^{1/2},$$

где h_{ϕ} – толщина пленки фоторезиста; w – скорость вращения центрифуги.

Величина const определяется одним однократным измерением толщины пленки фоторезиста при фиксированной скорости вращения центрифуги для данных условий. Для заданной концентрации фоторезиста имеется определенная

критическая скорость, превышение которой не вызывает дальнейшего уменьшения толщины слоя. Этот момент соответствует равновесию когезионных и центробежных сил.

Частоты вращения менее 1500 об/мин. приводят к краевому утолщению пленки фоторезиста, протяженность которого выражается формулой:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\sigma}{d\omega^2 R}},$$

где σ – поверхностное натяжение; R – радиус подложки; d – плотность жидкости; ω – частота вращения центрифуги.

Нанесенные на центрифуге слои зачастую содержат характерные дефекты в виде «комет». Эти дефекты возникают, если на поверхности подложки остались посторонние частицы – пыль, грязь и др., или если сама подложка неоднородна: в пленке окисла встречаются микровключения, например участки с кристаллитной структурой. В любом случае на таких местах вязкая масса фоторезиста задерживается и под действием центробежных сил возникают направленные от центра локальные утолщения или даже разрывы слоя. В этом отношении очень важную роль играет фильтрация самого фоторезиста.

Кроме центрифугирования применяют электростатическое нанесение фоторезиста, распыление его специальным пульверизатором, окунание и накатку вальками.

Сущность пульверизации заключается в диспергировании фоторезиста сжатым газом и нанесении его на пластину в виде мелкодисперсного аэрозоля. Этот метод характеризуется следующими достоинствами:

- хорошо контролируется толщина пленки;
- отсутствует утолщение на краях, неизбежно получаемое при нанесении центрифугированием;
- отсутствуют проколы и нарушения пленки, возникающие на дефектах подложки за счет центробежных сил при центрифугировании;
- имеется возможность нанесения слоя фоторезиста на профилированную подложку;
- сравнительно малый расход фоторезиста;

– обеспечивается высокая производительность и широкие возможности для автоматизации.

В то же время пульверизация требует специального подбора растворителей, так как слой не должен стекать по подложке, тщательной очистки фоторезиста и используемого для пульверизации воздуха или газа, разработки специального оборудования.

При *предварительной сушке* фоторезист равномерно распределяется по поверхности и из него удаляются пары растворителя. Из-за высокой точки кипения растворителя, входящего в состав фоторезиста ($>130\text{ }^{\circ}\text{C}$), растворитель всегда остается в небольших количествах в высушенной пленке (от нескольких процентов до 10 %). Этот остаточный растворитель влияет на скорость растворения экспонированного фоторезиста и, следовательно, на светочувствительность. Поэтому условия предварительной сушки должны хорошо контролироваться для воспроизводимого технологического процесса.

В конвекционных печах (с подачей горячего обеспыленного воздуха) сушка фоторезистов в зависимости от их типов продолжается при 80–100 (реже при 120 $^{\circ}\text{C}$) не более 30 мин. Если фоторезист подвергается в течение длительного периода времени воздействию высоких температур выше 100 $^{\circ}\text{C}$, то светочувствительный нафтохинондиазид термически разлагается и литографическая эффективность пленки падает. Поэтому температура в конвективном шкафу 90 $^{\circ}\text{C}$ и время сушки 30 минут являются нормальными.

Необходимо обратить внимание, что сушильный шкаф должен быть конвективным с принудительной циркуляцией. В противном случае время сушки возрастает на время, необходимое для достижения в шкафу без конвекции стационарной температуры 90 $^{\circ}\text{C}$.

Ситуация меняется, если сушка осуществляется на горячей плите. В этом случае время сушки сокращается обычно до 40–50 секунд. Так как кремний является хорошим проводником тепла, то равновесная температура достигается уже примерно через 10 секунд. По этой причине температура сушки на горячей плите

обычно на 10–20 °С выше, чем в печи. Приемлемые условия сушки на горячей плите – это 110 °С в течение 45 секунд.

Сушка фоторезистов в ИК- и СВЧ-печах значительно короче (минуты и секунды) и обеспечивает высокое качество слоев (отсутствие пор, трещин, вздутий, отслоений). Это объясняется тем, что при термической сушке растворитель в первую очередь испаряется с поверхности, т. е. образуется «корка», препятствующая последующему его удалению, что приводит к вздутию и отслаиванию слоя фоторезиста. При ИК- и СВЧ-сушке разогревается поверхность подложек и растворитель вначале удаляется изнутри.

Совмещение фотошаблона с подложкой может выполняться оператором визуально при наблюдении знаков совмещения или контроле зазора Δ между ними (рис. 3.10).

Точность этого метода $\pm(0,25 \dots 1)$ мкм, а автоматизированного фотоэлектрического не ниже 0,05–0,1 мкм.

При **экспонировании** фоторезистов используют ультрафиолетовые лампы высокого давления СВД-120, СВДШ-250 или ДРШ-500, обеспечивающие неравномерность освещения 5–10 % по полю подложки. При этом освещенность составляет значение от 15 до 20 тыс. люкс, время экспонирования – от 20 до 120 с., а область спектральной чувствительности лежит в диапазоне от 310 до 440 нм.

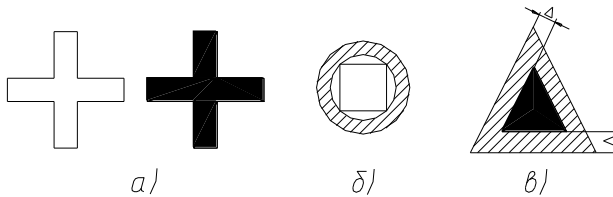


Рис. 3.10. Совмещение фотошаблона подложкой может выполняться оператором визуально при наблюдении знаков совмещения или контроле зазора Δ между ними:

а – фигура совмещения «линия-линия»; б – фигура совмещения «точка-линия»; в – фигура совмещения с контролируемым зазором

Все позитивные фоторезисты чувствительны к ультрафиолетовому свету, поэтому обычно используются ртутные лампы. Энергия света должна поглощаться фотоактивным соединением – нафтохинондиазидом. При экспонировании нафтохинондиазид превращается в инденкарбоновую кислоту. Эта кислота затем растворяется в щелочном проявителе.

Спектральная чувствительность фоторезиста определяется двумя факторами: ниже 310 нм новолачная смола, входящая в состав фоторезиста, проявляет сильное поглощение, предотвращая проникновение ультрафиолетового света в пленку фоторезиста, выше 440 нм нафтохинондиазид проявляет слабое поглощение на "хвосте" вплоть до 475 нм, выше этих длин волн фоторезист совершенно прозрачен и не проявляет светочувствительности. Таким образом, все работы с пленкой фоторезиста могут проводиться при желтом освещении.

В вышеуказанном диапазоне длин волн есть три максимума эмиссии ртутной лампы при 365 нм (*i*-линия), 405 нм (*h*-линия) и 436 нм (*g*-линия). Современные проекционные установки используют либо выделенную фильтрами линию длин волн (главным образом *g* и *i*-линии), либо две, либо все три линии – широкополосное экспонирование.

Во время экспонирования поглощение светочувствительного нафтохинондиазида падает из-за превращения в инденкарбоновую кислоту. Это одна из причин, обеспечивающих высокую разрешающую способность позитивных фоторезистов с практически вертикальными стенками профиля. В начале экспонируемая зона поверхности пленки становится более прозрачной по сравнению с не экспонируемой зоной. Таким образом, на поверхности пленки формируется виртуальная фотомаска для экспонирования нижележащих слоев, превращение нафтохинондиазида протекает далее в пленке фоторезиста до подложки.

Экспонирование позитивного фоторезиста следует выполнять при контролируемых окружающих условиях, особенно относительной влажности и температуре. Это требование вытекает из того, что превращение

нафтохинондиазида в проявляемую инденкарбоновую кислоту требует одной молекулы воды на одну молекулу нафтохинондиазида. Если воды нет, то нафтохинондиазид сшивается в нерастворимое соединение, экспонированные зоны пленки не будут проявляться в проявителе. Необходимая для реакции вода не содержится в пленке, а адсорбируется как влага из атмосферы. По этой причине фоточувствительность фоторезиста резко падает при относительной влажности менее 30 %.

Верхний предел относительной влажности не определяется самим фоторезистом, однако, если относительная влажность выше 60 %, на поверхности подложки будет абсорбироваться слишком много воды, что в конечном итоге приводит к потере адгезии фоторезиста. По этой причине можно рекомендовать относительную влажность на уровне 45 %. Гигроскопичную поверхность подложки можно обрабатывать гексаметилдисилазаном (*HMDS*) до нанесения фоторезиста.

Так как при контактной фотолитографии фотошаблон прижимают к поверхности подложки, большое значение имеет механическая прочность нанесенного на него рисунка (прозрачных и непрозрачных участков). Наименее прочны эмульсионные фотошаблоны (стеклянные пластины с экспонированной эмульсией), выдерживающие не более 20–30 контактов. Поэтому их обычно используют только в качестве эталонных фотошаблонов, с которых снимают копии – рабочие фотошаблоны. Рабочие фотошаблоны выполняют в виде стеклянных пластин с нанесенной на них пленкой хрома толщиной 0,1 мкм, в которой вытравлен необходимый рисунок. Такие фотошаблоны имеют высокую износостойкость, но обладают значительной отражательной способностью (50–60 %), что вызывает боковое засвечивание фоторезиста и снижает его разрешающую способность. Минимальный размер воспроизводимых элементов 2 мкм.

Этого недостатка лишены цветные фотошаблоны (красно-оранжевого цвета), на поверхность стеклянного основания которых нанесена пленка Fe_2O_3 и $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Отражательная способность таких фотошаблонов 10–15 %, а минимальные размеры воспроизводимых элементов до 0,5 мкм.

Пост-экспозиционная сушка (до проявления)

В большинстве случаев нет необходимости в пост-экспозиционной сушке. Экспонированный фоторезист может проявляться немедленно после экспонирования. Однако в некоторых случаях литографическая эффективность может быть улучшена путем применения постэкспозиционной сушки (после экспонирования и до проявления).

Особенно это касается экспонирования монохроматическим светом (степерьт g - и i -линии). Энергия света, поглощаемая слоями фоторезиста, меняется по толщине пленки. Эта вариация обусловлена в первую очередь интерференцией падающего и отраженного от подложки света. В результате этого явления образуются так называемые "стоячие волны", видимые вдоль профиля стенки с помощью электронного микроскопа.

Так как большинство поверхностей вызывают фазовый сдвиг волны на 180° для отраженного света, то на поверхности раздела фоторезист-подложка будет наблюдаться минимум интенсивности света. Если поверхностный слой подложки является прозрачным (диоксид кремния), то становится существенным толщина слоя диоксида кремния. В результате этого явления на подложке может оставаться тончайший «налет» слабо экспонированного фоторезиста, который не удаляется при проявлении.

Для удаления этого слоя приходится прибегать к существенному переэкспонированию фоторезиста. Стоячие волны являются видимой частью интерференционного эффекта. Этот эффект приводит к значительному изменению дозы экспонирования при изменении толщины пленки вдоль поверхности. Изменение толщины на 65 нм (четверть длины волны g -линии) может привести к 20 % изменению дозы экспонирования. Для i -линии этот эффект еще сильнее. Такие изменения толщины пленки наблюдаются на любой поверхности.

Эти эффекты могут быть минимизированы с помощью пост-экспозиционной сушки. Температура для этой сушки должна быть на 20°C выше температуры предварительной сушки, а время около 45–60 секунд. В процессе этого нагрева происходит до определенной степени диффузия экспонированного и не

экспонированного нафтохинондиазида и в результате наблюдается выравнивание различий в скорости растворения и, таким образом, выравнивание профиля фоторезиста. Чем выше разность температур между предварительной сушкой и постэкспозиционной сушкой, тем быстрее процесс диффузии.

Однако температура пост-экспозиционной сушки не должна превышать 130 °С, чтобы избежать значительного термического разложения нафтохинондиазида. Наилучшее решение – 110 °С в течение 50 секунд. Кроме того, введение пост-экспозиционной сушки улучшает адгезию и термическую стабильность профиля фоторезиста.

При проявлении негативных и позитивных фоторезистов в специальных растворителях удаляют соответственно неэкспонированные и экспонированные участки. Для проявления негативных фоторезистов применяют органические растворители (толуол, бензол, уайт-спирит и др.), а позитивных – слабые водные и водоглицериновые щелочные растворы (KOH, NaOH, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – тринатрийфосфат).

Условия проявления определяются, прежде всего, типом фоторезиста. Каждая марка фоторезиста имеет оптимальное время проявления. В большинстве случаев время проявления находится в пределах 20–50 с, только фоторезисты большой толщины (более 3 мкм) требуют большего времени проявления. Температура проявления сама по себе не является критической и обычная комнатная температура (20–25 °С) является приемлемой, однако для воспроизводимости процесса важно поддерживать температуру проявителя постоянной в пределах ± 1 °С.

Важно подчеркнуть, что при длительном хранении проявителя в контакте с воздухом, концентрация едкого калия постепенно падает из-за взаимодействия KOH с углекислым газом. По этой причине проявитель необходимо хранить в герметично закрытой емкости. Лучше всего использовать буферный проявитель, как правило, поставляемый поставщиком фоторезистов. Буферный проявитель несколько дороже стандартного раствора едкого калия, однако, его параметры не меняются в процессе хранения в течение многих месяцев. Кроме того, едкий калий весьма гигроскопичен. Гранулы едкого калия

поглощают воду из атмосферы в процессе хранения, поэтому точная масса растворенного КОН (по сухому остатку) неизвестна.

Необходим обязательный контроль КОН в растворе с помощью специальной методики, основанной на титровании. Это еще одна причина использования для проявления фоторезиста буферного проявителя от поставщика фоторезистов.

Цель стадии **задубливания** – это дальнейшая стабилизация пленки фоторезиста перед травлением. Обычная температура 140 °С в течение 30 минут в конвективном шкафу. На стадии задубливания удаляется остаточный растворитель, происходит термическое разложение нафтохинондиазида и структурирование пленки фоторезиста. Эти процессы улучшают адгезию и стойкость пленки к травителям.

Необходимо иметь в виду два фактора:

1 Термический шкаф должен обязательно иметь принудительную конвекцию, чтобы время нагрева пленки до температуры задубливания было минимальным. В противном случае время задубливания необходимо увеличить.

2 Задубливание необходимо осуществлять непосредственно перед травлением (максимум за 2 часа). Если этот период длиннее, то задубливание необходимо повторить перед травлением.

При плазмохимическом травлении с целью наилучшего сохранения профиля рисунка рекомендуется три стадии задубливания:

I-я стадия: 110 °С в течение 15 мин.; II-я стадия: 120 °С в течение 15 мин.; III-я стадия: 140 °С в течение 15 мин.

В приложении А приведены данные по некоторым маркам фоторезистов [53].

Травление является предпоследней операцией процесса фотолитографии, служит для формирования в слое фоторезиста заданного рельефа и оказывает значительное влияние на параметры ПТЧЭ.

Данный этап состоит из 2 операций:

- удаление материала ПТЧЭ (через проявленный фоторезист);
- удаление резистивной маски.

Удаление материала ПТЧЭ (травление технологического слоя) через маску в слое фоторезиста бывает двух видов, каждый из которых делится на «подвиды» (рис. 3.11) [48].

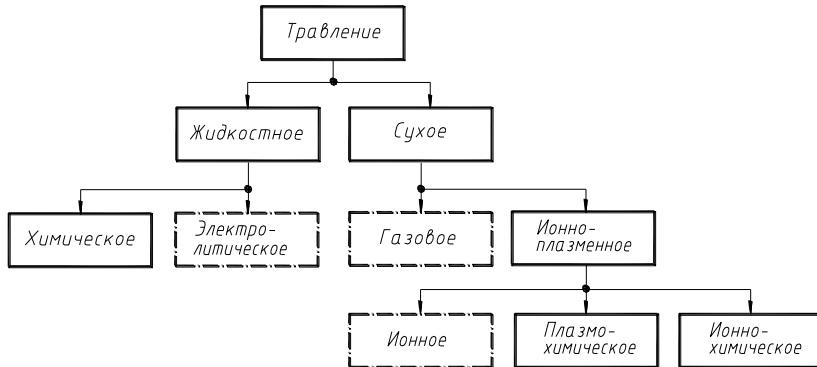


Рис. 3.11. Классификация процессов травления

Жидкостное травление. Основными параметрами режима травления, от которых зависят как его скорость, так и воспроизводимость размеров получаемых рельефов, являются:

- температура;
- концентрация травителя;
- время травления.

Так, с повышением концентрации травильной смеси и температуры скорость травления растет. Увеличение времени травления приводит к боковому подтравливанию рисунка, причиной которого может быть также рост температуры травителя [49].

При травлении в жидких травителях используются водные растворы неорганических соединений (обычно кислот). Химический состав и концентрация травителя в растворе подбирается так, чтобы поверхностный слой растворялся активно, а низлежащий не растворялся. С травлением в жидких травителях связано не только явление подтравливания под фотомаску, но и разброс величины подтравливания в совокупности элементов одного слоя.

К моменту окончания растворения слоя в «окне» фотомаски боковое травление оказывается примерно равным толщине слоя

(см. рис. 3.4), однако его окончание зависит от размеров вытравливаемого элемента («окна» в маске). В процессе травления возможны отвод продуктов химической реакции от поверхности в раствор и подвод из раствора свежего травителя. Оба процесса протекают благодаря взаимодиффузии, скорость которой и определяет скорость травления. В мелких элементах массообмен затруднен и скорость травления ниже, чем в крупных элементах. Поскольку технологическое время травления устанавливают по самому мелкому элементу, более крупные элементы получают «перетрав», т. е. большие погрешности размера.

Точность травления повышается, т. е. уменьшается разброс размеров элементов из-за растрыва при динамическом воздействии травителя на обрабатываемую поверхность.

Для получения устойчивых результатов необходимо в процессе жидкостного травления обеспечить термостатирование травильного раствора с отклонением не более $\pm(1-2)^\circ\text{C}$ и перемешивание раствора для исключения концентрационных и маскирующих эффектов. С целью уменьшения этих эффектов подложки в травильных ваннах помещают в вертикальном положении и осуществляют их возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости [74].

Конечный результат травления – конфигурация вытравленного профиля элементов схемы – определяется:

- предысторией формирования защитной фоторезистивной пленки (вязкость, чистота, качество нанесения и т. д.);
- адгезией пленки фоторезиста к поверхности либо напыленной сплошной структуры, либо коммутации и подложки (степень загрязненности поверхности под фоторезистом, правильно выбранный режим термообработки пленки на этапах «сушка», «дублирование»);
- геометрией вытравливаемых элементов (влияние «клина» проявления на ширину «узких» элементов);
- «клином» проявления.

Кроме того, протекание процесса травления, геометрические размеры вытравленных элементов схемы будут определяться:

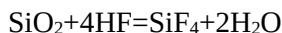
- типом выбранного травителя;

- температурой травителя;
- типом материала слоев;
- степенью смачиваемости травителем травимых поверхностей (введение смачивателя в состав травителя);
- толщиной слоев в напыленной структуре, ее разбросом.

Применение травителей, ведущих к образованию газообразных продуктов реакции, нежелательно, так как образующиеся пузырьки газа приводят либо к локальному маскированию травления технологических слоев, либо к отрыву пленки фоторезиста.

Качество рисунка можно улучшить, повышая температуру второй сушки фоторезиста, но при этом приходится учитывать возможности оплавления фоторезиста по краю изображения, в результате чего мелкие элементы не вытравливаются. Решать проблему качества травления следует, подбирая оптимальное сочетание типов фоторезиста, травителя и подложки. Особенно сильно качество травления зависит от характеристик низлежащих слоев, а поскольку они связаны с другими технологическими процессами, то от степени отработанности технологии в целом. Конечно, и на стадиях, предшествующих травлению, характеристики подложек играют важную роль, так изменение режимов напыления алюминиевых пленок приводит к колебаниям отражательной способности подложек, а следовательно, и к изменению условий экспонирования; окисление поверхности алюминия может вызвать плохое смачивание, приводящее к скатыванию фоторезиста при его нанесении на подложку.

При этом используемые травители должны быть избирательными, т. е. растворять данный слой и не воздействовать на лежащие ниже. Так, для травления SiO_2 применяют водный раствор плавиковой кислоты HF . При этом протекает следующая реакция:



и начинает интенсивно выделяться газообразный SiF_4 , который вызывает отслаивание, растравливание и разрывы пленки SiO_2 . Поэтому на производстве используют специальные травители, называемые буферными, позволяющие регулировать скорость

травления, в которые кроме плавиковой кислоты входят ее соли (например, травитель состава: NH_4F – 105 г., HF – 40 мл., H_2O – 210 мл.). Более подробно о жидкостном травлении, в частности, об анизотропном травлении, см. п. 1.7.

Плазменное травление

Под термином «плазменное травление» понимают процесс контролируемого удаления материала с поверхности подложек под воздействием ионов низкотемпературной плазмы в среде инертных газов или в среде, содержащей активные газы [74].

При «сухих» методах существенно уменьшено боковое подтравливание, характерное для химического жидкостного травления (рис. 3.12, а), поэтому клин травления уменьшается и вертикальный профиль рельефного рисунка элементов приближается к идеальному (рис. 3.12, б-г).

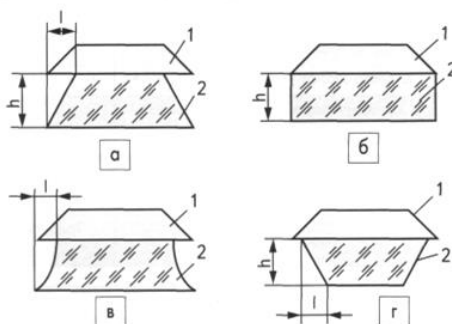


Рис. 3.12. Профили элементов рельефного рисунка после травления:

а – жидкостное травление; б – ионно-химическое травление; в, г – плазмохимическое травление 1 – слой фоторезиста; 2 – технологический слой

Кроме того, «сухое» травление слабо зависит от адгезии защитной маски фоторезиста к подложкам, которые после обработки не требуют операций промывки и сушки. При соответствующем подборе режимов и рабочих сред оно обладает высокой степенью анизотропии и селективности.

Плазма представляет собой ионизированный газ, состоящий из почти равных количеств положительно и отрицательно

заряженных частиц. В методах плазменного травления используют слабоионизированные газы, получаемые с помощью электрических разрядов при низких давлениях. Неупругие столкновения молекул газа с электронами, разогнанными электрическим полем, приводят к образованию ионов и свободных радикалов, которые могут вызвать травление за счет физических и химических взаимодействий с обрабатываемыми поверхностями. В зависимости от сочетания давления и энергии ионов плазмы характер процессов может меняться от чисто физического (распыление) до чисто химического (травление).

Распыление представляет собой физический процесс, в котором ионы плазмы ускоряются электрическим полем и ударяются о поверхность твердого вещества. Энергия ионов передается атомам поверхности, выбивая и переводя их в газовую фазу. Явление физического распыления лежит в основе двух методов травления с помощью плазмы:

- ионно-плазменного;
- ионно-лучевого.

Для получения практически приемлемых скоростей травления, т. е. для обработки поверхности достаточно большим количеством ионов, указанные процессы следует проводить при относительно низких давлениях (0,1–10 Па). Ионам надо сообщать энергию 0,5–10 кэВ. При меньших энергиях распыление не происходит, при больших ионы внедряются в обрабатываемый материал и распыление прекращается.

Существует метод чисто химического плазменного травления: электрический разряд в газе создает активные свободные радикалы, которые вступают в химическую реакцию с загрязнениями и веществом подложки, образуя летучие продукты. Обычно это происходит при более высоких давлениях, чем при физических способах травления. Данный метод более подробно будет рассмотрен далее.

Между крайними вариантами процесса – физическим распылением и плазмохимическим травлением – существует широкий спектр различных состояний плазмы и характера процессов ее взаимодействия с поверхностью подложек. Так, в

частности, отчетливо выделяют промежуточный процесс ионно-химического (реактивного) травления (рис. 3.13).

Это означает, что между физическими и химическими методами травления нет четкой границы. В общем случае при плазменном травлении могут совместно действовать оба механизма. При замене инертных газов в плазме на химически активные соединения, повышении давления и снижении средней энергии плазмы химическое травление усиливается, а физическое ослабевает.

В микрофотолитографии используются три метода плазменного травления:

- ионно-лучевое;
- ионно-плазменное;
- плазмохимическое.

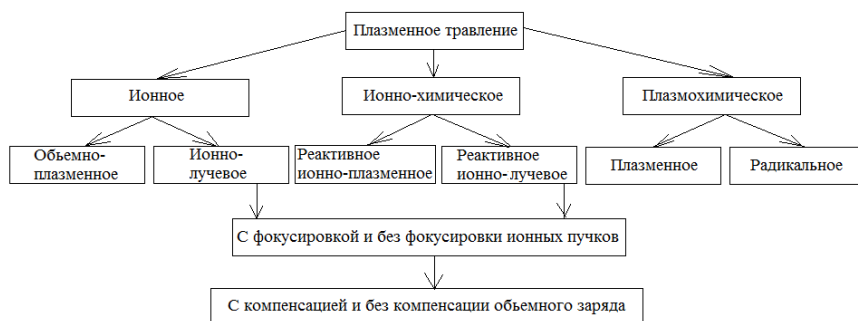


Рис. 3.13. Классификация процессов плазменного травления

Несмотря на такое большое разнообразие, все процессы плазменного травления по механизму взаимодействия с обрабатываемым материалом можно отнести к следующим типам:

- спонтанное химическое травление;
- физическое распыление;
- радиационно-возбуждаемое химическое травление;
- радиационно-стимулированное химическое травление.

Спонтанное химическое травление. Спонтанные (самопроизвольные) химические реакции с участием химически

активных частиц (ХАЧ) вносят основной вклад в удаление материала. К ним относятся все процессы, кроме ионно-плазменного (ИПТ) и ионно-лучевого (ИЛТ), в которых радиационная стимуляция и физическое распыление не повышают заметно скорость травления.

Необходимым условием для спонтанного травления материала является образование в результате химической реакции хотя бы одного летучего и стабильного (при температуре и давлении процесса) продукта (соединения). Термин «летучий» означает, что давление паров образующегося продукта должно быть достаточно высоким, чтобы он самопроизвольно испарялся с поверхности материала. Спонтанное химическое травление включает следующие основные стадии:

- доставку ХАЧ к поверхности обрабатываемого материала;
- адсорбцию ХАЧ на поверхности материала;

диффузию адсорбированных ХАЧ через адсорбционный слой реагентов и продуктов реакции к атомам (молекулам) материала;

- взаимодействие ХАЧ с атомами материала с образованием летучих и стабильных продуктов реакции;
- десорбцию продуктов травления с поверхности в газовую фазу;
- отвод продуктов травления с поверхности из газовой фазы реакционной зоны.

Физическое распыление. При этом процессе не происходят химические реакции, скорость травления материала определяется только процессом удаления атомов ионной бомбардировкой. К такому типу травления относятся процессы ИПТ и ИЛТ, в которых активные частицы не способны проводить химическую модификацию поверхности обрабатываемого материала.

Экспериментальные и теоретические исследования доказывают, что механизм физического (ионного) распыления связан с передачей кинетической энергии (импульса) бомбардирующей частицы атомам материала за счет столкновений и приводит к прямому их выбиванию из равновесных положений. Он является доминирующим в том диапазоне энергий бомбардирующих частиц, где ядерное

торможение частиц в материале мишени значительно больше электронного. Для тяжелых бомбардирующих частиц (ионов, атомов, молекул и нейтронов) это условие всегда выполняется в диапазоне энергий 0,1–1,0 кэВ, характерном для процессов ИПТ и ИЛТ.

Радиационно-возбуждаемое химическое травление. При этом процессе удаление материала происходит не с помощью спонтанных реакций травления, а за счет возбуждаемых радиационной стимуляцией химических реакций (доля физического распыления мала). К такому виду травления относятся реактивное ионно-плазменное (РИПТ) и реактивное ионно-лучевое (РИЛТ), в которых нейтральные газовые частицы спонтанно не обрабатывают материал.

В этом случае радиационное воздействие (РВ) само возбуждает химические реакции, и его параметры (вид, энергия, интенсивность, пространственное распределение) непосредственно определяют характеристики травления.

Радиационно-стимулированное химическое травление. Спонтанные химические реакции вносят существенный вклад в удаление материала. РВ в результате стимуляции химических реакций значительно увеличивает скорость травления, доля физического распыления мала. К такому виду относятся процессы плазменного травления (ПТ) – РИПТ и РИЛТ, в которых нейтральные газовые частицы спонтанно обрабатывают материал.

В этом случае роль РВ заключается в стимулировании (активировании) спонтанных химических реакций.

Ионное травление. В зависимости от способа получения ионов и среды, в которой находятся образцы, ионное травление разделяется на два вида:

- ионно-плазменное;
- ионно-лучевое.

При ионно-плазменном травлении образцы, закрепленные на катоде газоразрядного устройства, подвергаются бомбардировке ионами инертного газа (обычно ионами Ar) из области плазмы. Все остальные части реактора заземлены и являются анодом. Площадь катода намного меньше площади анода, поэтому плазма занимает весь объем реактора, а

наибольшее падение напряжения приходится на область разряда вблизи катода. Экран предотвращает распыление с защищаемых им участков поверхности катода.

При ионно-лучевом травлении образцы помещают в высоковакуумную камеру установки и подвергают бомбардировке ионами из автономного источника. Ионы могут быть получены в виде сфокусированного пучка. Для формирования ионного луча служит система вытягивающих, ускоряющих и фокусирующих линз. Для компенсации положительного заряда, накопленного на обрабатываемых поверхностях, применяют подогреваемый катод, эмитирующий электроны (нейтрализатор).

Ионное травление – универсальный способ для обработки многослойных пленочных структур с несовместимыми в условиях жидкостной химической обработки свойствами слоев. (Оно может быть использовано для очистки поверхности любых материалов от примесей любого типа.)

Недостатком ионного травления для размерной обработки и формирования конфигураций элементов ПТЧЭ является низкая селективность (избирательность) скорости травления различных материалов. Сюда же можно отнести высокое радиационное и тепловое воздействия, при которых в формируемые микроструктуры вносят дефекты, а также загрязнение подложек частицами удаляемого материала.

Плазмохимическое травление. Удаление поверхностного слоя материала в этом процессе происходит за счет химического взаимодействия между ионами и радикалами активного газа и атомами обрабатываемой подложки с образованием летучих соединений. В зависимости от среды, в которой находятся подложки, плазмохимическое травление подразделяют на:

- плазменное (образцы находятся непосредственно в плазме химически активных газов);
- радикальное (образцы находятся в вакуумной камере, отделенной от газоразрядной с химически активной плазмой перфорированными металлическими экранами или магнитными и электрическими полями).

Радикальное травление осуществляется электрически нейтральными, но химически активными атомами или радикалами газоразрядной плазмы.

Плазмохимическое травление может протекать при хаотическом воздействии активных частиц, но лучше, чтобы они имели направленное движение, при котором процесс становится анизотропным и практически не возникает клин травления. Для этого давление в реакторе должно быть не более 10 Па. При этом в рабочий газ добавляют небольшое количество водорода.

Применяют два типа реакторов для плазменного травления, в которых для генерирования плазмы используется ток высокой частоты. Реактор первого типа содержит камеру с внешними электродами, внутри которой имеется держатель для вертикально устанавливаемых пластин. Камера обычно выполняется в форме цилиндра, отсюда название реактора – цилиндрический. В реакторе второго типа электроды находятся внутри, а пластины размещаются горизонтально. Электроды обычно расположены в параллельных плоскостях, поэтому такая конструкция получила название реактора с параллельными электродами.

Благодаря высокой производительности цилиндрического реактора он хорошо подходит для выполнения таких неотвечественных операций, как снятие фоторезиста. Однако этот реактор, как правило, не годится для анизотропного травления. Поэтому реакторы данного типа не пригодны для большинства операций травления при изготовлении ПТЧЭ, требующих высокого разрешения и точности.

Недостатком плазмохимического травления является трудность контроля клина травления.

Ионно-химическое травление. Ионно-химическое травление сочетает достоинства ионного и плазмохимического травления. Механизм ионно-химического травления – совместное воздействие распыления и химической реакции. Преимущество перед плазмохимическим состоит в возможности травления даже тех материалов, которые не образуют летучих соединений с радикалами.

Ионно-химическое травление осуществляют в тех же установках, что и ионное травление, только в качестве рабочего

используют не инертный, а химически активный газ. В диодных системах в большинстве случаев используют для получения плазмы ВЧ-напряжение, обеспечивающее стабильный разряд в химически активных газах. В установках с автономными ионными источниками нельзя применять накаливаемый катод, который быстро выходит из строя при взаимодействии с химически активной плазмой.

К преимуществам ионно-химического и плазмохимического травления по сравнению с ионным также относится большая скорость обработки, обусловленная сочетанием физического (бомбардировка) и химического (активный газ) воздействий. Создание в реакторах магнитного поля увеличивает скорость и селективность любого из этих методов травления в результате повышения ионизации молекул рабочего газа.

В заключении подраздела, описывающего плазменное травление, в табл. 3.3 приводятся типичные технологические характеристики процесса плазменного травления.

Таблица 3.3

Характеристика	ИПТ	ИЛТ	РТ	ПТ	РИПТ	РИЛТ
Средняя скорость травления функционального слоя, нм/с	0,1-1,0	0,3-3,0	1,0-10	3,0-15	1,0-5,0	0,5-3,0
Равномерность травления, %	90-95	95-97	90-99	80-95	90-95	95-97
Селективность травления функционального слоя относительно маски и подслоя	2,0-5,0	2,0-5,0	20-50	10-30	5,0-10	5,0-10
Анизотропия травления функционального слоя	5,0-10	10-100	2,0-5,0	5,0-20	10-50	10-100
Коэффициент загрузки	1,0	1,0	0,5-1,0	0,6-1,0	0,8-1,0	1,0
Показатель перетрава	2,0	2,0	1,1	1,3	1,5	1,5

Удаление фоторезиста является последней и исключительно ответственной операцией процесса фотолитографии, так как от нее зависит качество последующих технологических операций производства ПТЧЭ: окисления, диффузии, нанесения металлических пленок.

В зависимости от типа фоторезиста для его удаления используют концентрированные кислоты (H_2SO_4 , HNO_3), щелочи (KOH , NaOH) или органические растворители (трихлорэтан, диоксан, диметилформамид и др.). Для интенсификации процесса кислотные и органические растворители нагревают до 60–100 °С. Кроме того, применяют ультразвуковую и высокочастотную плазменную обработку.

Необходимо отметить, что при контактной фотолитографии размеры получаемых элементов ПТЧЭ составляют 1 мкм и более. Это объясняется механическими повреждениями рабочих фотошаблонов и подложек, попаданием пылинок и микрочастиц в слой фоторезиста и прокалыванием его, а также налипанием фоторезиста на фотошаблоны.

Проекционная фотолитография, при которой изображение фотошаблона проецируется через специальный объектив с высокой разрешающей способностью на плоскость подложки, не имеет этих недостатков. В результате увеличивается срок службы фотошаблонов и уменьшается количество дефектов в слое фоторезиста. Кроме того, процесс проекционной фотолитографии можно автоматизировать в большей степени, чем контактной. Вместе с тем при этом методе предъявляют более высокие требования к плоскостности подложек и однородности толщины слоя фоторезиста. Разрешающая способность проекционной фотолитографии 0,4–1 мкм.

Рентгенолучевая литография основана на воздействии мягкого рентгеновского излучения (ускоряющее напряжение 8 кВ) на рентгенорезист и позволяет за счет более коротких длин волн, чем при ультрафиолетовом излучении, получать размеры элементов 0,3–0,5 мкм. В качестве рентгенорезиста используют материал на основе полиметилметакрилата, отличающийся высокой стабильностью свойств, нечувствительностью к ультрафиолетовому излучению и достаточной

кислотостойкостью (кроме HCl). Рентгеношаблоны обычно изготавливают из кремния, так он хорошо пропускает рентгеновские лучи, а рисунок выполняют в виде тонкой золотой пленки, их не пропускающей.

Отсутствие отражения и рассеяния, а также контакта между резистом и рентгеношаблоном и нечувствительность к загрязнениям (рентгеновское излучение практически не поглощается) позволяют считать рентгенолучевую литографию наиболее адекватной для создания ПТЧЭ с субмикронными (менее 1 мкм) размерами элементов.

Электронолитография, позволяющая еще более повысить разрешающую способность (минимальные размеры элементов составляют 0,1–0,15 мкм), основана на взаимодействии пучка ускоренных электронов с электронорезистом – полимерным материалом, нечувствительным к ультрафиолетовому излучению. При этом экспонирование может производиться как сфокусированным (проекционным) пучком электронов, так и его сканированием по заданной программе, что исключает применение фотошаблонов.

3.5. Диффузия

3.5.1. Физические процессы, происходящие при диффузии в полупроводниках

Диффузия в полупроводниках – процесс последовательного перемещения атомов примеси в кристаллической решетке, обусловленной тепловым движением [11]. В полупроводниках существует два вида диффузии:

- диффузия в кристалле, находящемся в состоянии химического то есть при однородном химическом составе и однородном распределении собственных дефектов – самодиффузия атомов растворителя;
- диффузия в условиях, когда система не находится в состоянии химического равновесия и градиенты химических потенциалов вызывают появление результирующих химических потоков – химическая или взаимная диффузия.

При повышенной температуре атомы в узлах решетки колеблются вблизи равновесного положения.

Для изготовления *p-n*-переходов используется химическая диффузия примесных (растворенных) атомов, которые вводятся в кристаллическую решетку для изменения ее электрофизических свойств. Перемещение примеси в решетке происходит посредством последовательных скачков, осуществляемых в трех направлениях. При наличии градиента концентрации собственных или атомов точечные дефекты (атом в междоузлии или вакансии) оказывают влияние на их диффузию.

К основным механизмам диффузии относятся следующие: прямой обмен атомов, кольцевой, эстафетный, краудинный, диссоциативный, вакансионный.

В общем случае диффузия анизотропна. Однако в кубической решетке из-за ее симметрии диффузия изотропна. Процессы изотропной диффузии описываются с помощью коэффициента диффузии D , который является скалярной величиной и определяется из первого закона Фика. При одномерной диффузии:

$$j = D \partial N / \partial x,$$

где j – плотность потока атомов или дефектов вещества;

D – коэффициент диффузии;

N – концентрация атомов или дефектов вещества.

Температурная зависимость коэффициента диффузии:

$$D = D_0 e^{-E_a / kT},$$

где D_0 – постоянная величина в пределах сотен градусов, при которых осуществляется диффузия;

E_a – энергия активации для скачка атома;

k – постоянная Больцмана;

T – температура диффузии.

Изменение концентрации растворенного вещества во времени при одномерной диффузии определяется вторым законом Фика:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right). \quad (3.21)$$

При диффузии на небольшую глубину с относительно низкой концентрацией примеси (концентрация электронов и дырок ниже концентрации собственных носителей n или $p < n_i$ при температуре диффузии) коэффициент диффузии не зависит от концентрации, поэтому уравнение (3.21) можно записать:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}.$$

Однако при высоких уровнях легирования наблюдается значительное увеличение коэффициента диффузии, что имеет место при влиянии на движение примеси возникающего при химической диффузии электрического поля и при взаимодействии примеси и точечных дефектов с точечными дефектами, находящимися в различном заряженном состоянии.

Примеси, диффундирующие по межузельному механизму в кремнии, принадлежат к примесям внедрения. К ним относятся элементы I и VIII групп Периодической системы элементов – литий, натрий, калий, аргон, гелий, водород. Обычно эти примеси электрически неактивны, кроме лития, действующего как донор в кремнии.

Примеси, диффундирующие по вакансионному механизму, относятся к примесям замещения. Их движение зависит от количества точечных дефектов в кристаллической решетке и их заряда. К ним относятся примеси, принадлежащие к III и V группам Периодической системы элементов. Для изготовления легированных областей в кремнии (как n -, так и p -) в основном используются алюминий, бор, галлий, индий, сурьма, мышьяк, фосфор. Как уже упоминалось выше, наибольшее распространение в качестве тензорезисторов ПТЧЭ датчиков давлений используется кремний p -типа проводимости. Поэтому далее более подробно остановимся на формировании тензорезисторов методом диффузии бора, как рекомендованного [46] для формирования чувствительных элементов датчиков механических параметров.

Бор является единственной акцепторной примесью с предельной растворимостью, достаточно большой для создания областей с максимальной концентрацией примеси.

На рис. 3.14 представлен коэффициент диффузии бора в кремний по данным [11].

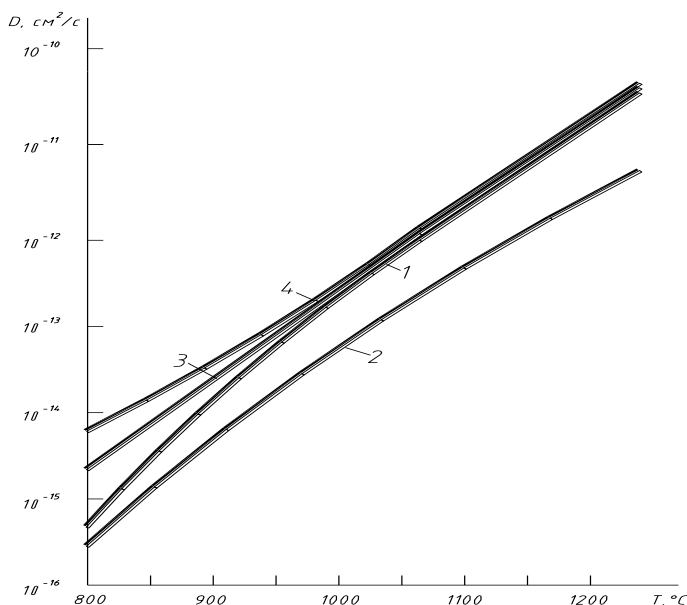


Рис. 3.14. Коэффициент диффузии бора в кремний по данным:

1 — зависимость коэффициента диффузии бора в кремний от температуры в нейтральной среде с образованием пары примесь-ионизированная вакансия; 2 — зависимость коэффициента диффузии бора в кремний от температуры в нейтральной среде с образованием пары примесь-нейтральная вакансия; 3 — зависимость коэффициента диффузии бора в кремний от температуры в окисляющей среде по направлению к плоскости (111); 4 — зависимость коэффициента диффузии бора в кремний от температуры в окисляющей среде по направлению к плоскости (100)

Диффузия бора в кремний изотропна, если выполняется в нейтральной среде, и тогда $D = 3,17 \exp(-3,59/kT)$. В окисляющей атмосфере коэффициент диффузии бора увеличивается в значительной мере для ориентации (100) и несколько меньше для (111).

Помимо [10] существует другие теории относительно определения коэффициента диффузии бора в кремний, представленные в [27].

В полупроводниковой технологии наибольший интерес представляют два случая распределения примесных атомов.

1 Если диффузия идет из источника с ограниченным содержанием примеси, находящейся в начальный момент в бесконечно тонком поверхностном слое, то профиль распределения концентрации имеет вид:

$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

где N – плотность атомов примеси под единицей площади поверхности, неизменная в любой момент диффузии, ат/см²;

x – глубина, соответствующая данной концентрации, см;

D – коэффициент диффузии примеси, см²/с;

t – длительность диффузии, с.

Глубина залегания диффузионного p - n -перехода:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln(C_0 / C_B)}, \quad (3.22)$$

где C_B – концентрация примеси в исходной пластине полупроводника. При $x=0$ поверхностная концентрация примеси:

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}}.$$

Для многих практических случаев глубина p - n -перехода:

$$x_j \approx 6\sqrt{Dt}. \quad (3.23)$$

2 Если диффузия идет из источника с постоянной поверхностной концентрацией примесных атомов C_0 , то распределение имеет вид:

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}.$$

Для допустимого упрощения вместо erfc -функции можно использовать аппроксимацию:

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0,3 \right)^2 \right].$$

Для этого случая глубина залегания p - n -перехода:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \left(\sqrt{\ln(C_0/C_B)} - 0,3 \right).$$

При последовательной диффузии ряда примесей пластина полупроводника подвергается многократным циклам диффузии. Для расчета $C(x,t)$ в этом случае следует использовать сумму:

$$Dt = D_1t_1 + D_2t_2 + D_3t_3 + \dots$$

3.5.2. Методы расчетов диффузионных структур

При проведении расчетов диффузионных структур решают два основных типа задач: определения профиля концентрации примеси на основании заданного технологического режима (прямая задача) и определение режима процесса диффузии на основании параметров конечного распределение режима процесса диффузии в структуре (обратная задача). Рассмотрим примеры решения прямых задач.

Расчет распределения примеси в случае двухстадийной диффузии. Как отмечалось, особенностью диффузии планарной технологии является разбиение ее на две стадии. Стадия загонки примеси осуществляется в течение короткого времени t_1 при постоянной поверхностной концентрации C_{01} . Введенное при загонке количество примесных атомов N служит источником диффузанта при последующей разгонке в течение времени t_2 с изменяющейся во времени поверхностной концентрацией:

$$C_{02} = N / \sqrt{\pi D_2 t_2}.$$

Для построения профиля распределения примеси в случае двухстадийной диффузии необходимо знать температуры и длительность загонки и разгонки. Температура T_1 задает коэффициент диффузии примеси D_1 и поверхностную концентрацию C_{01} , определяемую предельной растворимостью примеси (рис. 3.15).

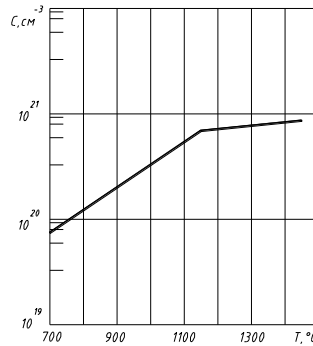


Рис. 3.15. Зависимость предельной растворимости бора в кремнии от температуры

Поверхностная плотность атомов примеси, введенной на стадии загонки, определяется интегрированием распределения примеси:

$$N = \int_0^{\infty} C(x) dx = \int_0^{\infty} C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}}.$$

Распределение примеси после стадии разгонки определяется выражением:

$$C(x, t) = \frac{2C_0}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right).$$

Пример. Построим профиль распределения примеси и определить глубину залегания p - n -перехода в случае двухстадийной диффузии бора в кремний с электропроводностью n -типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см, проводимой в режиме: $T_1=1050$ °C, $t_1=10$ мин, $T_2=1150$ °C, $t_2=2$ ч.

Определим C_{01} . Пользуясь рис. 3.15, найдем, что для $T=1050$ °C предельная растворимость бора в кремнии составляет $3 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Принимаем $C_{01}=3 \cdot 10^{20}$ см⁻³.

Определим D_1 . С помощью рис. 3.14, для $T=1050$ °C найдем, что $D_1=8 \cdot 10^{-13}$ см²/с.

Вычислим N :

$$N = 2C_{01} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{20} \sqrt{\frac{8 \cdot 10^{-13} \cdot 10 \cdot 60}{3,14}} = 7,418 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}.$$

Определяем D_2 . С помощью рис. 3.14, для $T=1150^\circ\text{C}$ найдем, что $D_2 = 8 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$.

Построим кривую распределения:

$$\begin{aligned} C(x, t) &= \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) = \\ &= \frac{7,418 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}\right) = \\ &= 1,744 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{x^2}{2,304 \cdot 10^{-7}}\right). \end{aligned}$$

Профиль распределения концентрации бора после разгонки показан на рис. 3.16.

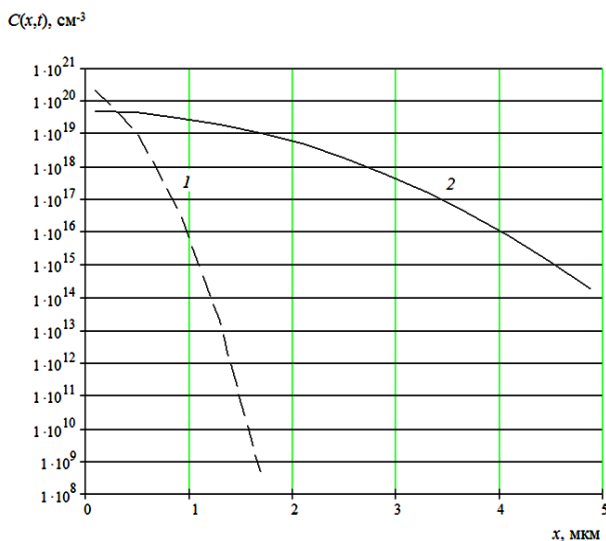


Рис. 3.16. Расчетные профили распределения бора:
1 – после загонки; 2 – после разгонки

Для сравнения там же приведена кривая распределения бора после стадии загонки:

$$C(x, t) = C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}.$$

Определим глубину залегания p - n -перехода. Согласно формуле (3.22):

$$x_j = 2\sqrt{D_2 t_2} \sqrt{\ln(C_{02}/C_B)}.$$

Значение концентрации примеси в исходной пластине найдем с помощью кривой, представленной на рис. 3.12. Для $\rho_B = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ $C_B = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Тогда

$$x_j = 2\sqrt{8 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} \sqrt{2,3 \lg \frac{1,744 \cdot 10^{19}}{1,5 \cdot 10^{15}}} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 4,5 \text{ мкм}.$$

Расчет по упрощенной формуле (3.23) дает

$$x_j = 6\sqrt{D_2 t_2} = 4,2 \text{ мкм},$$

что достаточно близко к точному значению.

Примеры распределения примеси при диффузии из слоя конечной толщины, в случае двойной последовательной диффузии, а также определение режимов диффузии (обратные задачи) более подробно рассмотрены в [79].

3.5.3. Методы проведения диффузии

Параметры диффузионного слоя определяются видом легирующей примеси и ее концентрацией. Технологически сложным является воспроизводимое получение поверхностных концентраций примесей ниже $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при сохранении высокой степени однородности поверхности, особенно на пластинах большого диаметра. Для получения воспроизводимой и регулируемой поверхностной концентрации примеси в полупроводниковой подложке используют:

- нанесение диффузанта на пластины в ходе диффузии (внешний источник), при этом разрабатываются методы регулирования содержания соединения примеси в атмосфере, окружающей полупроводниковые пластины во время диффузии;

- нанесение диффузанта на пластины кремния до диффузии, здесь роль играет регулирование количества примеси, наносимой на пластины перед диффузией, и обеспечение однородности их поверхности.

Основным требованием диффузионной системы является доставка диффундирующей примеси к поверхности подложки и проведение диффузии при определенной температуре в течение определенного времени.

Необходимо, чтобы система удовлетворяла следующим требованиям:

- возможность регулирования поверхностной концентрации примеси;

- отсутствие нарушений поверхности подложки при диффузии;

- возможность проведения процесса одновременно на большом количестве пластин.

Источники примеси подразделяются на внешние источники и примесные покрытия.

Внешние источники подразделяют на газообразные, жидкие и твердые. Твердые источники имеют вид: порошка (помещаются в реактор в тигельках из кварца, алунда, платины); дисков (твердые пленарные источники), вырезанных из материала, содержащего примесь, как правило, в связанном виде (устанавливаются в лодочку параллельно размещенным вертикально кремниевым пластинам) (рис. 3.17).

Примесными покрытиями, из которых осуществляется диффузия примеси, являются легированные окислы; предварительно легированные поликристаллический или аморфный кремний и силициды таких тугоплавких металлов, как молибден, титан, вольфрам; фоторезисты-диффузаны и высокомолекулярные полимеры, содержащие примеси; бориды редкоземельных металлов. По мере поиска подходящих материалов этот перечень может быть продолжен.

Далее более подробно рассмотрим метод диффузии с использованием твердых источников, как рекомендованных [30] для создания p^+ областей ПТЧЭ. Наибольшее практическое значение имеет диффузия бора, так как из элементов III группы индий образует относительно глубокий акцепторный уровень 0,16 эВ выше валентной зоны, а алюминий и галлий не маскируются пленками двуокиси кремния.

Процесс диффузии происходит следующим образом.

Подложка помещается в открытую трубу из кварца (см. рис. 3.17). Для каждой примеси используют свою трубу и лодочку во избежание загрязнений различными примесями. Пластины вводятся в трубу с одного конца, а с другого подаются газы и примесь. Выходной конец трубы сообщается с атмосферой. Труба располагается по оси одного или двух нагревателей. Кремниевые пластины обычно помещаются в высокотемпературной части трубы; если используется внешний источник, то он располагается ближе к входу газа.

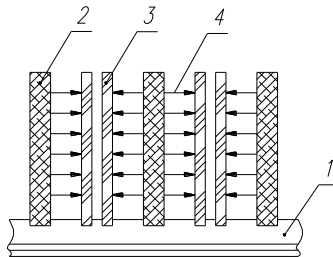


Рис. 3.17. Размещение твердых планарных источников в кварцевую лодочку:

1 – лодочка; 2 – источники; 3 – кремниевые пластины;
4 – испаряемое вещество

При использовании внешних источников в лодочку из платины, алунда или кварца загружается источник примеси, и она размещается со стороны поступления газа-носителя, перед лодочкой с пластинами кремния.

В процессе диффузии газ-носитель переносит пары от источника к поверхности пластины. Чтобы отключить источник, его нужно передвинуть в более холодную зону печи. Однородность легирования сильно зависит от давления паров в

источнике. Чтобы регулировать давление паров, источник устанавливают при более низкой температуре, чем температура диффузии. Для этого используют двухзонную печь. Тем не менее, часто источники и пластины размещают при одинаковой температуре.

При использовании примесных покрытий исключается транспортирование паров диффузанта к подложке. Этот метод используется для изготовления пластин большого диаметра, где требуется точное управление диффузией. Осажденные твердые источники позволяют получать очень низкие поверхностные концентрации за счет подбора соответствующего соотношения примесь-связующее вещество. Поверхностная концентрация регулируется уже не пределом растворимости, а концентрацией примеси в покрытии. Этот метод позволяет получать низкие концентрации в одностадийном процессе, отпадает необходимость стадий загонки и разгонки примеси.

У бора высокая предельная растворимость, его поверхностная концентрация может достигать $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Тетраэдрический радиус бора в кремнии $0,88 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}$, для кремния – $1,17 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}$. Поэтому наличие большого числа атомов бора приводит к возникновению индуцированных механическими напряжениями дефектов, которые создают значительные повреждения кристаллической решетки. Чтобы избежать этого эффекта, концентрацию бора не следует поднимать выше $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Элементарный бор инертен при температуре выше температуры плавления кремния. Следовательно, диффузия происходит за счет поверхностей реакции между окислом бора B_2O_3 и кремнием:



Избыточное количество бора ведет к образованию силицидов и других соединений бора на поверхности подложки. Этот тонкий скин-слой представляет собой диэлектрические, темные по цвету, пленки, часто являющиеся причиной брака приборов из-за высоких контактных сопротивлений. Скин-слой не растворяется ни в какой кислоте. Но окислением кремния во влажном кислороде или в парах воды можно перевести этот слой

в боросиликатное стекло, которое растворяется в плавиковой кислоте. Гораздо легче предупредить образование этого слоя проведением диффузии в слабо окисляющей среде с объемной долей водорода 0,03...0,10. Это способствует формированию SiO_2 и уменьшает вероятность образования скин-слоя. Фазовая диаграмма системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ представлена на рис. 3.18.

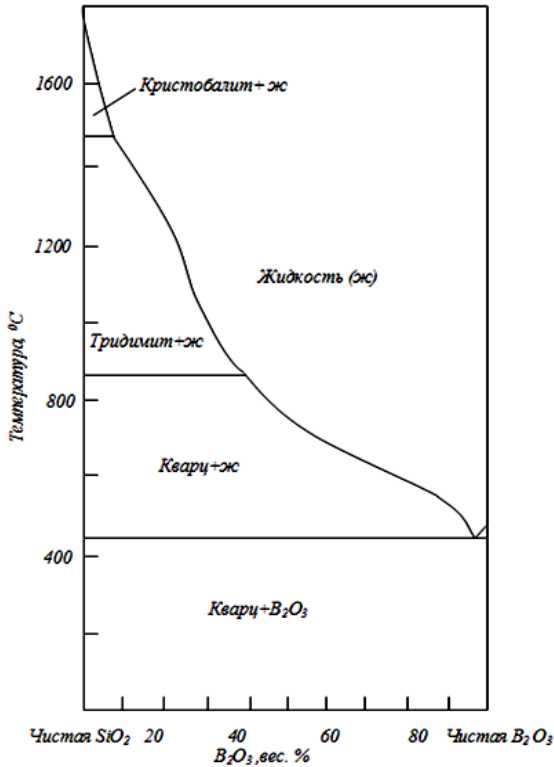


Рис. 3.18. Фазовая диаграмма системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$

Наиболее распространенным внешним твердым источником диффузии бора в кремний является окись бора B_2O_3 , а также борная кислота H_3BO_3 . Борная кислота разлагается при 473 К с образованием B_2O_3 и паров H_2O . Эффективное испарение B_2O_3 начинается с 1043...1073 К, а максимальная температура, до

которой обычно нагревают B_2O_3 , составляет 1473 К. Наиболее часто используется интервал температур источника от 1223 до 1323 К. Источник диффузанта, состоящий из B_2O_3 или H_3BO_3 , необходимо вводить в печь медленно, чтобы предотвратить вскипание и вытекание его из лодочки.

Пролившаяся через край B_2O_3 превращается в дополнительный источник примеси, вплоть до последующей очистки трубы, если H_3BO_3 , необходимо вводить в печь медленно, чтобы предотвратить вскипание и вытекание его из лодочки. Пролившаяся через край B_2O_3 превращается в дополнительный источник примеси, вплоть до последующей очистки трубы, если не предусмотрена какая-либо дополнительная защита.

Элементарный металлический бор обычно непригоден для диффузии в потоке газа из-за низкого давления его паров. Если же ввести в поток газа небольшое количество водяного пара, то бор внешнего источника окисляется и тогда источником примеси служит образовавшийся окисел.

Окись бора часто используется в двухзонных печах или в бокс-методе, при этом обеспечивается разброс поверхностного сопротивления не лучше 10...20 % при $R_s=20...50$ Ом [10].

Твердые планарные источники (ТПИ) для диффузии бора создают в реакционной зоне пары окиси бора B_2O_3 , молекулы которой диффундируют к поверхности кремниевых пластин и взаимодействуют с кремнием по реакции (3.24).

Из образующегося слоя боросиликатного стекла происходит диффузия бора вглубь кремния. Основными материалами для изготовления твердых планарных источников бора являются нитрид бора BN и B_2O_3 в связанном виде. Перед эксплуатацией ТПИ на основе BN окисляют с целью образования на его поверхности тонкого слоя B_2O_3 , который при температурах диффузии (973...1523 К) находится в жидком состоянии. Перед B_2O_3 в газовую фазу происходит в результате испарения слоев. Твердые планарные источники из материалов, содержащих B_2O_3 в связанном виде выделяют ее при нагревании непосредственно в процессе диффузии. Предварительного окисления для таких ТПИ не требуется.

Благодаря физико-химическим и механическим свойствам BN ТПИ на основе BN отличаются стабильностью и длительным сроком службы. По мере испарения B_2O_3 производится периодическое окисление источников.

При диффузии в газовой фазе возможно образование метаборной кислоты $B_2O_3 + H_2O = 2HBO_2$. Давление HBO_2 на несколько порядков превышает давление B_2O_3 . Поскольку давление H_2O в диффузионной системе не ниже 30 ПА, основным компонентом газовой фазы является HBO_2 , а не B_2O_3 . Повышенное (по сравнению с равновесным давлением B_2O_3) содержание бора в газовой фазе, а также более высокие значения коэффициента диффузии HBO_2 дают возможность получать близкие к предельной растворимости поверхностные концентрации. Поэтому в реактор контролируемо вводят пары H_2O , используют низкомолекулярные газы-носители (He , $N_2 + He$, H_2 , $H_2 + He$), в которых молекулы примеси имеют более высокие коэффициенты диффузии.

Для повышения однородности и воспроизводимости концентрации бора процесс диффузии бора из BN усложняют также кратковременной инъекцией в газовую среду водорода, который способствует образованию летучей метаборной кислоты.

Имеется ряд ограничений при использовании твердого источника этого типа. Первое: B_2O_3 часто образует на поверхности SiO_2 труднорастворимую фазу SiB . Для предотвращения этого явления в газ-носитель вводятся небольшие добавки кислорода. Это приводит к неоднородности по поверхности, так как скорость окисления регулируется радиальным газом потоком между пластинами. Другая проблема заключается в прилипании пластин BN и подложек к лодочке.

Диффузия на ТПИ на основе NB в основном дает высокую концентрацию бора в кремнии, однородность легирования составляет $\pm 5\%$ на пластине в $\pm 10\%$ в партии.

Кроме того, в технологии используют так называемый вспомогательный источник бора, который получается насыщением кремниевой пластины бором из NB

непосредственно перед проведением процесса. Такой метод позволяет повысить однородность легирования при невысокой концентрации бора в кремнии.

3.6. Ионное легирование

Внедрение ионов (ионная имплантация, ионное легирование) в кремниевую подложку для формирования слоев с нужной проводимостью является основным методом легирования полупроводниковых материалов при создании ПТЧЭ датчиков давлений.

Суть процесса ионного внедрения заключается в формировании пучков ионов с одинаковой массой и зарядом, обладающих необходимой заданной энергией, и внедрении их в подложку или мишень в определенном количестве, называемом дозой. Таким образом, основными характеристиками процесса являются энергия и доза пучка ионов.

Нужная энергия E_0 приобретается ионом под действием разности потенциалов U :

$$E_0 = neU,$$

где n – кратность ионизации, $n = 1, 2, 3$; e – заряд электрона.

(Например, $^{31}P^+$ означает, что внедряется однократно ионизированный (+) ион фосфора с атомной массой 31; BF_2^+ – однократно ионизированная молекула фторида бора).

Доза ионов определяется количеством частиц на единицу площади:

$$N_0 = Q / ne = j / tne [\text{ион} / \text{см}^2],$$

(1 мкКл/см² для $n = 1$ соответствует примерно $6,25 \cdot 10^{12}$ ион/см²).

Преимущественное использование ионного легирования перед диффузионным позволяет обеспечить:

- строгое задание количества примеси, определяемого током ионов во время внедрения;
- воспроизводимость и однородность распределения примеси;

- возможность использования в качестве маски при легировании слоев SiO_2 и Si_3N_4 ;
- внедрение через тонкие слои диэлектриков и резистивных материалов;
- пониженную в сравнении с диффузией температуру.

Вместе с тем процесс ионного внедрения сопровождается рядом явлений, для устранения которых необходимо использование специальных технологических приемов. В результате взаимодействия с ионами в решетку полупроводника вносятся радиационные повреждения, которые при последующих операциях могут искажать профили распределения примеси. Дефекты способствуют также увеличению токов утечки и изменению других характеристик приборов. Устранение дефектов требует постимплантационной высокотемпературной обработки (отжига).

3.6.1. Пробег ионов

При движении в твердом теле быстрый ион в результате столкновений с ядрами и электронами теряет свою энергию и останавливается. Полная длина пути, пройденного ионом, и ее проекция на направление первоначального движения иона называются соответственно пробегом R и проекцией R_p пробега. По всей длине пробега образуются дефектные области (рис. 3.19).

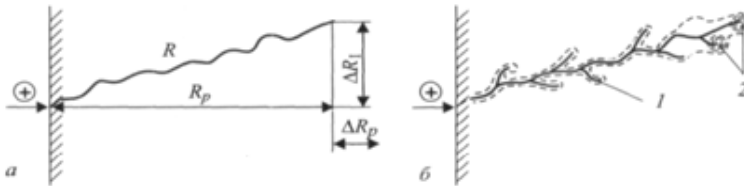


Рис. 3.19. Схема движения внедряемого иона:

- а* — пробег R , проекция пробега R_p и рассеяние пробега ΔR_p и ΔR_1 ;
б — образование дефектных областей в подложке на пути иона
 (1 — точечные дефекты; 2 — аморфные области)

Вследствие того, что число столкновений и энергия, передаваемая при столкновении, являются переменными величинами, характеризующими случайный процесс, пробег

ионов данного типа с одной и той же начальной энергией не будет одинаковым. Другими словами, движущиеся ионы после торможения останавливаются в точках, разбросанных по всему объему твердого тела, что приводит к распределению пробегов и их проекций, для описания которых требуются такие характеристики функции распределения, как средний пробег ионов и среднеквадратичное отклонение пробега ионов (или проекций пробегов).

Распределение пробегов имеет исключительно важное значение с точки зрения применения ионного внедрения для проектирования и изготовления ПТЧЭ. Нужно знать, во-первых, какое распределение пробегов ожидается для пучка заданной энергии, если известны материал подложки и ионы, которые требуется внедрить, и, во-вторых, каким образом можно осуществить модуляцию энергии пучка в процессе внедрения, чтобы получить желаемое распределение пробегов.

Все подложки можно разделить на два типа: аморфные и монокристаллические. Аморфными мишенями служат маски из окислов или других диэлектриков. Монокристаллические подложки – сам кремний и другие полупроводники.

Распределение пробегов в аморфной мишени зависит главным образом от энергии, масс и атомных номеров бомбардирующих ионов и атомов мишени, плотности и температуры мишени во время ионной бомбардировки, дозы внедренных ионов. Для монокристаллической мишени распределение пробегов, кроме того, сильно зависит от ориентации кристалла относительно ионного пучка, условий на поверхности мишени и ее предыстории.

Теоретический расчет распределения пробегов в мишени того или иного типа является столь сложной задачей, что ни одним теоретическим приближением нельзя пользоваться для всех случаев, представляющих практический интерес, из-за слишком широких пределов изменения наиболее существенных переменных величин. В случае внедрения ионов в аморфные и неориентированные кристаллические мишени обычно используется теория Линдхарда, Шарфа и Шютта (называемая теорией ЛШШ), которая позволяет рассчитать ряд параметров,

характеризующих измеряемые распределения пробегов с точностью, вполне удовлетворительной с точки зрения основных практических применений [44].

Для расчета зависимости пробега от энергии частицы в случае ионного внедрения рассматриваются два основных вида потерь энергии: в результате взаимодействия с электронами твердого тела (как связанными, так и свободными) и при столкновении с ядрами мишени.

Считается, что эти два вида потерь энергии не зависят друг от друга.

При внедрении ионов малых энергий радиационные дефекты образуются вдоль всей траектории частицы, а в случае бомбардировки ионами высокой энергии – только в конце пробега. При ориентации кристалла в произвольном направлении иону трудно избегать близких ядерных столкновений. Соответственно движущийся атом, влетая в решетку, теряет в результате большого числа ядерных столкновений значительную часть своей энергии (выбивая атомы из узлов решетки), так что кристалл предстает в виде почти аморфной мишени. В этом случае для оценки распределений пробегов можно использовать изложенную теорию.

В том случае, когда кристалл ориентирован точно по направлению с низкими кристаллографическими индексами, для движущегося иона ряды атомов кристалла образуют как бы канал (рис. 3.20, *а*), а траектория иона совпадает с осью канала (рис. 3.20, *б*).

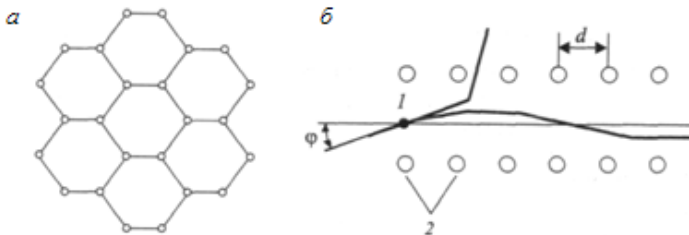


Рис. 3.20. Эффект каналирования:

а – расположение атомов в кремнии в плоскости, перпендикулярной направлению [110]; б – движение внедренного иона вдоль канала 1, образованного атомами мишени 2

Движение частиц строго по центру канала маловероятно, однако вполне может существовать траектория, осциллирующая около оси канала, из-за последовательных легких соударений иона с рядами атомов, образующих стенки канала. Максимальный угол φ , при котором исчезает направляющее действие ряда атомов, называется критическим углом каналирования φ_k .

Значения критического угла в зависимости от энергии некоторых бомбардирующих ионов, представляющих практический интерес, приведены в табл. 3.4 для трех основных ориентации кремниевой мишени.

Таблица 3.4
Критические углы каналирования в кремнии

Ионы	Энергия, кэВ	φ_k , град		
		$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 100 \rangle$
В	30	4,2	3,5	3,3
	50	3,7	3,2	2,9
Р	30	5,2	4,3	4,0
	50	4,5	3,8	3,5
As	30	5,9	5,0	4,5
	50	5,2	4,4	4,0

Если падающий пучок ориентирован вдоль кристаллографической оси в пределах угла каналирования, то существенная часть падающих ионов будет направлена по каналам; в противном случае кристаллическая мишень окажется по существу неотличимой от аморфной.

Часть ионов может в результате столкновений выйти из канала – такие ионы принято называть деканализованными.

Канализованные ионы образуют иногда явно выраженный пик. Качественно теория ЛШШ представляет окончательное распределение ионов в виде суперпозиции двух гауссовых распределений, обладающих двумя максимумами (рис. 3.21).

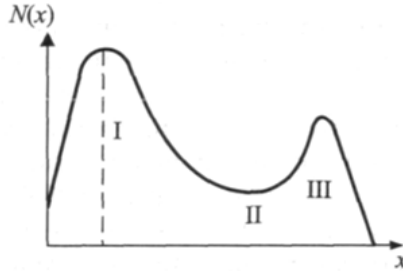


Рис. 3.21. Распределение примеси при каналировании:
 I – основное распределение; II – деканализованные ионы;
 III – каналированные ионы

3.6.2. Дефекты структуры в полупроводниках при ионном легировании

Процесс ионного легирования в отличие от процесса термической диффузии сопровождается возникновением в материале мишени большого количества разнообразных структурных дефектов, называемых радиационными. Число дефектов может достигать нескольких сотен на один внедренный ион. От наличия дефектов и их концентрации зависят многие свойства полупроводника. Например, электропроводность легированных полупроводниковых слоев определяется концентрацией не только введенной примеси, но и дефектов. Радиационные дефекты приводят к появлению энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, которые способствуют росту скорости рекомбинации и снижению концентрации и подвижности свободных носителей заряда.

В настоящее время путем отжига при повышенной температуре удастся восстановить исходную структуру кристалла и почти полностью ионизировать примесные атомы, введенные в полупроводник в процессе ионного легирования. Это обусловлено большой подвижностью первичных точечных радиационных дефектов – междоузельных атомов и вакансий.

Поскольку монокристалл обладает тепловой энергией, в нем имеются дефекты решетки, определяемые условиями теплового равновесия. Если в кристалл внедряются ионы, то возникающие

в нем дефекты решетки отличаются от дефектов, возникающих при тепловом равновесии.

Внедряемые ионы, сталкиваясь с атомами мишени, передают им кинетическую энергию. Если передаваемая ионом энергия превышает некоторую пороговую энергию $E_{\text{пор}}$, то атом мишени выбивается из узла решетки и может двигаться через кристалл. Пороговой энергией называется наименьшая энергия, которую надо сообщить колеблющемуся около положения равновесия атому, чтобы он оказался в междоузлии. Обычно пороговая энергия заключена в пределах 15–80 эВ (например, 16 эВ для кремния). Смещенный атом мишени может в свою очередь сместить другие атомы. Таким образом, первичный ион вызывает при подходящей энергии каскад атомных столкновений, в результате которого возникают разнообразные дефекты.

Качественно картина образования области радиационных нарушений при движении иона в кристалле показана на рис. 3.19, б. Вдоль движущегося иона образуется сильно разупорядоченная область, которая находится в метастабильном состоянии. Размеры этой разупорядоченной области зависят от массы и энергии иона, массы атомов мишени, ее температуры и структуры кристалла.

При ионном легировании характерными являются дефекты по Френкелю, представляющие собой совокупность выбитого из узла в междоузлие атома полупроводника и образовавшегося пустого узла – вакансии V . Вакансии p -типа равна 0,33 эВ, а в кремнии n -типа – 0,18 эВ. Междоузельные атомы также подвижны: в кремнии p -типа их энергия миграции составляет 0,01 эВ, а в кремнии n -типа – 0,4 эВ.

Вакансии при своем движении по кристаллу могут объединяться в пары – дивакансии или более сложные комплексы – тривакансии, тетравакансии и даже гексавакансии. Эти дефекты устойчивы при комнатной температуре. Вакансии образуют также комплексы с атомами примесей: $V+P$, $V+Sb$, $V+Al$, $V+O$. При этом вакансия занимает узел, соседний с примесным атомом.

В результате объединения простых дефектов, например, под действием механических напряжений, возникают линейные и

плоскостные дефекты – дислокации, дефекты упаковки. Плотность дислокаций, подсчитанная по фигурам травления в кремнии при дозе ионов $3 \cdot 10^{16}$ ион/см², составляет $3 \cdot 10^5$ см⁻². В процессе отжига линейные дефекты могут изменять свою длину, форму и местоположение в кристалле.

Характер возникающих дефектов зависит от массы иона, полной дозы и температуры мишени. Простейшие дефекты, например, дефекты по Френкелю, возникают в кремнии при внедрении легких и средних ионов малыми дозами при комнатной температуре. Условно легкими и средними считают ионы с атомной массой $M < 60$, тяжелыми – с $M > 60$.

При внедрении тяжелых ионов малыми дозами при комнатной температуре в кристаллической решетке возникают разупорядоченные области, называемые кластерами. Кластер в кремнии представляет собой отдельную разупорядоченную область, которая состоит из центральной области нарушенной структуры диаметром, равным примерно 50 нм, окруженной областью объемного заряда, создаваемого благодаря захвату основных носителей дефектами центральной области.

При больших дозах ионов разупорядоченные области, т. е. кластеры, перекрываются, концентрация дефектов может превысить предельную. В этом случае происходит аморфизация полупроводника.

Таким образом, при малых дозах внедрения ионов области разупорядочения, прилегающие к отдельным трекам ионов, пространственно отделены друг от друга, при больших дозах внедрения ионов отдельные области разупорядочения перекрываются, образуя в кристалле сплошной аморфный слой.

Распределение дефектов по глубине кристалла, их концентрация зависят от числа и распределения первоначально смещенных атомов. При вычислении числа смещенных атомов обычно учитывают лишь упругие ядерные столкновения, т. к. они в основном приводят к разупорядочению решетки вблизи траектории иона и ответственны за эффекты радиационного повреждения. Зная энергию, теряемую ионами в ядерных столкновениях, можно оценить среднее число смещенных атомов, их усредненное пространственное распределение.

Число смещенных атомов N_d в твердом теле обычно находят по формуле, выведенной Кинчином и Пизом:

$$N_d(E) = \frac{E}{2E_d}, E \gg E_d,$$

где E – энергия иона; E_d – эффективная пороговая (то есть наименьшая) энергия смещения атома мишени из узла кристаллической решетки.

При этом предполагается, что атомы при соударении ведут себя как твердые шары и все соударения упругие, т. е. на электронное возбуждение энергия не расходуется. Указанная формула выведена для случая равных масс иона и атома мишени, но и для случая неравных масс это выражение удовлетворительно согласуется с экспериментом.

Имеются теоретические расчеты распределений дефектов (смещенных атомов) по глубине при бомбардировке неориентированных мишеней различными ионами. На рис. 3.22 показано распределение концентрации бора N и дефектов N_d по глубине при бомбардировке Si ионами B^+ (расчет методом Монте-Карло).

Расчеты, выполненные по этому методу, показывают, что распределение вакансий соответствует распределению потерь энергии в процессе торможения.

Характерной особенностью распределения дефектов является смещение их максимума в сторону меньших глубин относительно максимума концентрации примесных атомов. Это объясняется тем, что слои, расположенные в районе максимума концентрации примесей, экранируются вышележащими слоями кремния и испытывают смещения от меньшего числа ионов по сравнению со слоями, расположенными ближе к поверхности. Действительно, прежде чем ион в процессе столкновений потеряет значительную часть своей кинетической энергии и прекратит перемещение внутри кристаллической решетки кремния, он создаст на пути своего движения область с высокой концентрацией радиационных дефектов. Эта сильно

разупорядоченная область оказывает экранирующее действие по отношению к лежащему ниже слою, задерживая часть ионов с энергией $E \geq E_d$ и уменьшая тем самым вероятность образования дефектов в этом слое.

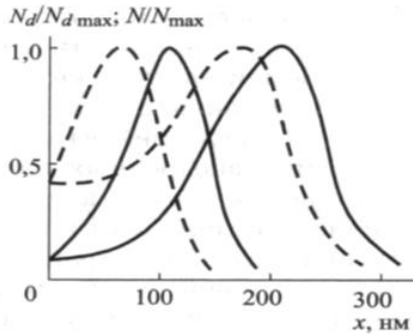


Рис. 3.22. Распределение внедренных ионов бора N (сплошные кривые) и дефектов N_d (штриховые кривые) в кремнии (энергии ионов бора 20 и 40 кэВ)

Возникновение двух пространственно разделенных областей с высокой концентрацией радиационных дефектов и высокой концентрацией примеси может привести к тому, что сильно легированный слой полупроводника окажется отделенным от поверхности образца высокоомным аморфным слоем. Последующий отжиг полупроводника с такой структурой приведет к смещению профиля концентрации примеси ближе к поверхности из-за диффузии атомов примеси в область с наибольшей концентрацией вакансий. Концентрация радиационных дефектов для ионов одинаковой энергии увеличивается с ростом массы иона. Это происходит как за счет уменьшения толщины поврежденного слоя (сокращается длина пробега более тяжелого иона), так и вследствие роста доли энергии, затрачиваемой на упругие столкновения.

Число дефектов зависит также от дозы легирования. При дозах менее 10^{14} ион/см² число дефектов линейно растет с увеличением концентрации внедренных ионов, причем максимум дефектов совпадает с областью торможения ионов.

Дальнейшее увеличение дозы приводит к переходу кремния в аморфное состояние, при этом концентрация дефектов остается постоянной. Если пучок ионов ориентирован относительно кристаллографической оси, то при малых дозах (менее 10^{14} ион/см²) образуется в два-три раза меньше дефектов, чем при неориентированном пучке. С ростом дозы легирования это различие быстро уменьшается вследствие увеличения вероятности деканалирования на накапливающихся дефектах решетки.

3.6.3. Распределение внедренных ионов

При ионном легировании первичным процессом является проникновение ускоренных ионов в вещество и их торможение до тепловых скоростей. Установившееся в результате этого распределение внедренных атомов примеси по глубине называют профилем торможения. Окончательное распределение примесных атомов, в которое часто вносят вклад диффузионные процессы, а также распределение носителей тока не всегда совпадают с профилем торможения.

Основными характеристиками профиля торможения примесных атомов являются средняя проекция пробега $\bar{R}_p$ и среднеквадратичный разброс проецированных пробегов или среднее нормальное отклонение проекции пробега ΔR_p . По теории ЛШШ $\bar{R}_p$ связана с полным пробегом $\bar{R}$ приближенным соотношением:

$$\bar{R}_p \cong \frac{\bar{R}}{1 + \frac{2}{3} \frac{M_2}{M_1}},$$

где M_1 – масса иона; M_2 – масса атома мишени.

Среднеквадратичное отклонение (дисперсию) проекции пробега можно вычислить по формуле:

$$\frac{\overline{\Delta R_p^2}}{\bar{R}_p^2} \cong \frac{2}{3} \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)}.$$

При столкновениях с атомами мишени ион отклоняется на углы, зависящие от прицельного расстояния и масс сталкивающихся частиц. Если $M_1 \gg M_2$, то отклонения малы и ион движется почти прямолинейно, поэтому его полный пробег $\bar{R}$ слабо отличается от проекции пробега $\bar{R}_p$. Если же $M_1 \leq M_2$, а энергия иона не слишком велика, то траектория иона извилиста и $\bar{R}_p$ значительно меньше $\bar{R}$.

Распределение проекций пробегов считается гауссовым. Поскольку рассматривается проекция пробега на направление движения ионов до их столкновения и остановки в мишени, то это распределение совпадает с распределением внедренных ионов по глубине пластины.

Профиль торможения имеет вид гауссовой кривой и распределение внедренных ионов в единице объема мишени можно записать следующим образом:

$$N(x) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp \left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2 \Delta R_p^2} \right], \quad (3.25)$$

где x – глубина от поверхности мишени; N_0 – количество легирующих ионов на единицу площади, ион/см².

Среднее значение проекций пробега и среднее нормальное отклонение проекций пробега для ионов III и V групп таблицы Менделеева с различной энергией в кремниевой мишени приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Средние значения проекций пробегов и нормальных отклонений в кремнии, нм

Ион		Энергия иона, кэВ					
		20	40	80	100	140	200
¹¹ B ⁺	R_p	73	161	324	398	537	725
	ΔR_p	32	54	84	94	110	126
³¹ P ⁺	R_p	29	49	98	123	175	254
	ΔR_p	9,4	16,4	30	35	47	61
¹⁵ As ⁺	R_p	16	27	48	58	79	110
	ΔR_p	3,7	6,2	10,5	12,5	16	22

Используя данные табл. 3.5 для любой примеси в кремнии и зная дозу внедренных ионов, можно расчетным путем найти профиль торможения ионов в кристалле.

На рис. 3.23 показаны типичные кривые распределения фосфора и бора при ионном легировании кремния.

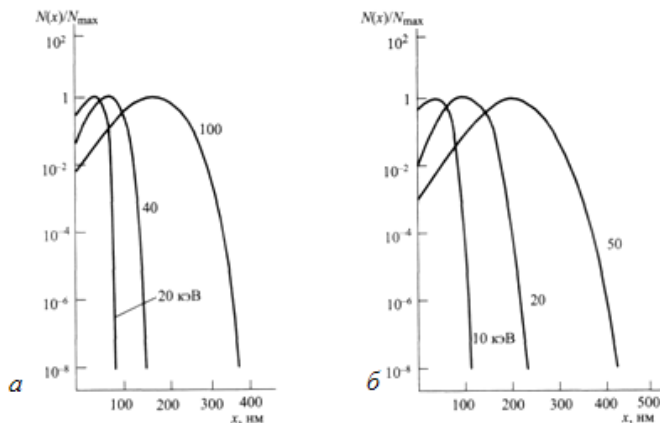


Рис. 3.23. Типичные кривые распределения фосфора и бора при ионном легировании кремния:

а – распределение фосфора при имплантации с различными энергиями;

б – распределение бора при имплантации с различными энергиями

Как следует из рисунка, максимум концентрации внедренной примеси N_{max} не соответствует поверхностной концентрации (что было характерно для диффузионных процессов), а наблюдается в глубине полупроводника. С увеличением энергии ионов максимум концентрации ионов перемещается в глубь полупроводника, а поверхностная концентрация уменьшается.

Максимум концентрации внедренных ионов отстоит от поверхности мишени на расстоянии $\bar{R}_p$, а его значение, как следует из (3.25), равно:

$$N_{max} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi \Delta R_p}} \cong \frac{N_0}{2,5 \cdot \Delta R_p} \cong \frac{0,4 N_0}{\Delta R_p}.$$

В планарной технологии внедрение ионов проводится локально с использованием масок из различных материалов. Чаще всего маской служит слой диоксида или нитрида кремния. Используются также металлы, например, молибден и вольфрам, пленки фоторезиста. Ясно, что для защиты кремния необходимо знать, какой должна быть толщина маскирующей пленки.

Кроме того, для предотвращения каналирования внедрение ионов часто проводят через тонкий слой аморфного диэлектрика (SiO_2 , Si_3N_4), который в этом случае служит рассеивающим слоем, т. е. поток ионов в сам полупроводник внедряется уже под некоторым углом к поверхности, так что кристалл для этих ионов представляет собой как бы аморфное образование. В этом случае необходимо учесть влияние второго слоя на распределение ионов.

Для точного вычисления профилей такого распределения нужно либо пользоваться методом Монте-Карло, либо решать транспортное уравнение Больцмана. Оба метода сложны и требуют неоправданно больших затрат машинного времени. Для практических задач можно использовать простой прием, пригодный для материалов, имеющих близкие атомные номера и массы, как в случае SiO_2 и Si_3N_4 для кремния. Считая распределение гауссовым, предполагается, что пробеги в каждом из этих слоев неизвестны. В маскирующем слое толщиной d_1 будет находиться количество примеси Φ_1 :

$$\Phi_1 = \int_0^{d_1} N(x)dx = \frac{\Phi}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - \bar{R}_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} \right].$$

В полупроводник попадает примесь, количество которой равно $\Phi_2 = \Phi - \Phi_1$. Если толщину полупроводника d_2 выбрать так, чтобы в ней содержалось количество примеси Φ_1 , как и в маскирующем слое, то для такой ситуации:

$$\Phi_2 = \int_0^{d_2} N(x)dx = \frac{\Phi}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{d_2 - \bar{R}_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \right].$$

Очевидно, что

$$\operatorname{erf} \frac{d_1 - \bar{R}_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} = \operatorname{erf} \frac{d_2 - \bar{R}_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}},$$

а значит

$$\frac{d_1 - \bar{R}_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} = \frac{d_2 - \bar{R}_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}}.$$

Отсюда толщина слоя кремния d_2 , эквивалентного по количеству примеси диэлектрику, равна:

$$d_2 = \bar{R}_{p2} + \left(d_1 - \bar{R}_{p1}\right) \frac{\bar{\Delta R}_{p2}}{\bar{\Delta R}_{p1}}.$$

В результате распределения примеси в маске и в полупроводнике определяются выражениями:

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi\Delta R_{p1}}} \exp \left[-\frac{\left(x - \bar{R}_{p1}\right)^2}{2\Delta R_{p1}^2} \right], 0 \leq x \leq d_1;$$

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi\Delta R_{p1}}} \exp \left[-\frac{\left\{ \left(x - d_1\right) + \left(d_1 - \bar{R}_{p1}\right) \frac{\bar{\Delta R}_{p2}}{\bar{\Delta R}_{p1}} \right\}^2}{2\Delta R_{p2}^2} \right], x \geq d_1.$$

Следует отметить, что на границе двух фаз из-за различий в тормозной способности кремния и диэлектрика концентрация примеси должна изменяться скачком (рис. 3.24).

Ионное внедрение сопровождается рядом вторичных явлений, которыми часто пренебрегают при расчете примесных профилей. Одним из таких явлений может быть распыление атомов самого полупроводника или внедряемых ионов.

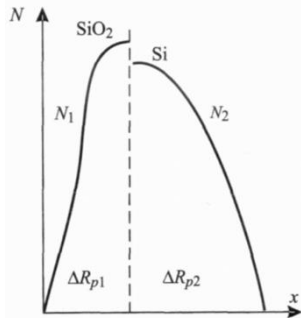


Рис. 3.24. Распределение примеси в двухслойной структуре

Попадающий на поверхность мишени ион с невысокой энергией в поверхностном слое полупроводника вызывает каскад атомных столкновений. Некоторые из атомов этого каскада вблизи поверхности могут покинуть мишень. Этот эффект весьма ощутим в случае использования больших доз, особенно для тяжелых ионов. Изменение профиля распределения примеси может быть при этом очень заметным, вплоть до насыщения, когда число внедряемых ионов становится равным числу распыленных атомов. Энергия распыленного атома должна превышать поверхностную энергию связи U_0 , равную для кремния 7,81 эВ.

Параметром, характеризующим этот процесс, является коэффициент распыления S , который определяется как число атомов, выбитых одним первичным ионом. Он зависит от энергии, массы иона и угла соударения с поверхностью. При малых энергиях ионов существует порог возникновения распыления. При энергиях выше порога коэффициент распыления возрастает до максимального значения, но при высоких энергиях падает, т. к. в этом случае энергия иона выделяется на значительной глубине, и атом, получивший эту энергию, не может выйти из мишени, но может двигаться в направлении, противоположном внедряемым ионам, внося радиационные повреждения в решетку мишени.

Если считать, что скорости распыления для иона и атомов мишени одинаковы, атомов отдачи нет, а изменение объема из-за распыления пренебрежимо мало, то, в отличие от обычного

распределения, максимум концентрации ионов лежит не в глубине, а на поверхности полупроводника и равен:

$$N_{\max}(x) = \frac{N_0}{2S} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\bar{R}_p}{\sqrt{2\Delta R_p}}\right).$$

Величина $N_{\max}$ не зависит от дозы имплантации и мало зависит от пробегов ионов.

Если распыление наблюдается при относительно небольших энергиях, то неупругие взаимодействия с электронами, напротив, имеют место при значительных величинах энергии ионов. Взаимодействия с электронами не приводят к рассеянию иона или атома из-за малой величины передаваемого импульса, но вызывают возбуждение и ионизацию электронных оболочек как внедряемого иона, так и атома мишени. Если это происходит вблизи поверхности, то приводит к испусканию электронов, фотонов и рентгеновского излучения.

3.6.4. Отжиг легированных структур

Целью отжига является восстановление кристаллической структуры легированных областей кремния и активация внедренной примеси. Причем необходимо провести отжиг таким образом, чтобы достичь максимального эффекта за минимальный промежуток времени при минимальной температуре с целью избежать диффузионного размывания профиля.

Отжиг образцов после имплантации ведет к восстановлению кристаллической решетки и способствует переходу внедренных ионов примеси в узлы решетки, где они способны проявить свои донорные или акцепторные свойства. Для активации примеси достаточно отжечь кремний при температуре около 500 °С примерно в течение получаса. Однако при этой температуре присутствие кластеров и неполное восстановление решетки снижает подвижность носителей заряда и вызывает сильную температурную зависимость проводимости. После отжига при такой температуре в решетке еще остаются различные дефекты.

Поскольку число атомов кремния, смещенных при имплантации, много больше числа имплантированных ионов, в не полностью отожденном слое преобладают ловушки с глубокими энергетическими уровнями, что заметно уменьшает количество носителей. С ростом температуры отжига до 650 °С в области аморфного слоя происходит резкое возрастание концентрации носителей, связанное с процессом эпитаксиальной рекристаллизации этого слоя и перехода атомов примеси в узлы решетки. При этом наблюдается и увеличение эффективной подвижности из-за уменьшения рассеяния носителей на дефектах. Однако концентрация носителей в максимуме распределения остается много ниже полной концентрации внедренной примеси.

С помощью электронной микроскопии установлено, что при рекристаллизации образуются дислокации. Атомы бора или фосфора в этом случае, скапливаясь на дислокациях, образуют преципитаты, в результате концентрация активной примеси уменьшается. Устранение дислокаций происходит при значительно более высокой температуре, причем с ростом дозы внедрения необходимо повышать температуру отжига.

Существенное значение имеет длительность отжига. При температуре около 1000 °С для полной активации примеси требуется отжиг в течение времени свыше 30 мин. Предполагается, что атомы примеси локализованы на краях дислокаций и находятся в междоузельном состоянии. Термически генерированные вакансии мигрируют к этим образованиям, вследствие чего примеси удается встроиться в узлы кристаллической решетки. В случае бора В⁻ в этом процессе принимают участие положительно заряженные вакансии V⁺, образуя нейтральный комплекс (V⁺-В⁻), имеющий высокую подвижность. При образовании аморфных слоев их отжиг также происходит при температуре, близкой к 1000 °С.

В простейшем случае при небольшой дозе внедренной примеси и невысокой (<1000 °С) температуре отжига конечное распределение примеси могло бы быть описано выражением:

$$N_x = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi(\overline{\Delta R_p^2} + 2Dt)}} \exp \left[-\frac{(x - \overline{R_p})^2}{2\overline{\Delta R_p^2} + 4Dt} \right],$$

где D – коэффициент диффузии примеси; t – время отжига.

Полный отжиг дефектов структуры зависит от выбора температуры и времени обработки, причем определяется длительностью процесса с наибольшей температурой.

В том случае, когда концентрация примеси велика и происходит аморфизация, как установлено экспериментально, аморфный слой толщиной 30–300 нм эпитаксиально рекристаллизуется уже в первые миллисекунды отжига при температурах 900–1200 °С. При рекристаллизации монокристаллическая область подложки под аморфизированным слоем играет роль затравки. Скорость рекристаллизации зависит от уровня легирования и кристаллографической ориентации кремния и составляет 0,1–100 нм/мин. Быстрая рекристаллизация позволяет считать, что на протяжении времени отжига в несколько десятков секунд в области кремния, подвергавшейся аморфизации, концентрация точечных дефектов термодинамически равновесна. Вследствие этого коэффициент диффузии примеси в области, где возникла аморфизация подложки, имеет равновесное значение, радиационно-стимулированной диффузии нет.

В тех случаях, когда для постимплантационного отжига нет возможности использовать быстрый термический отжиг, в целях предотвращения расплывания профиля легирования применяется отжиг при пониженной температуре (600–900) °С. Однако и в этих случаях наблюдается радиационно-ускоренная диффузия примеси, хотя параметры этого процесса отличаются от наблюдаемых при быстром отжиге. Особенно заметно это явление при легировании кремния бором при его концентрации меньше $2n_i$ (при температуре отжига). Предполагалось, что при низкой температуре ускорение диффузии объясняется взаимодействием примеси с нейтральными точечными дефектами.

3.7. Травление

3.7.1. Вопросы моделирования анизотропного травления кремния в плоскости (100)

Технологии локального формообразования применяется на практике для получения прецизионных фигурных областей с определенной формой микропрофиля. Предварительно определяя геометрию упругого элемента, можно управлять такими важными для датчиков характеристиками как диапазон измерения и чувствительность. Известно, что на сегодняшний день существует ряд достаточно распространенных технологий микропрофилирования элементов и узлов микромеханики, таких как электроискровой и электрохимический метод, термическое наращивание и удаление, лазерное профилирование, механическое фрезерование, изотропное, анизотропное травление и др. Но при этом технология травления (как изотропного, так и анизотропного) выгодно отличаются от других возможностью группового изготовления элементов и структур ПТЧЭ.

Наряду с этим существует целый ряд технологий травления:

- анизотропное жидкостное;
- изотропное жидкостное;
- электрохимическое;
- газовое;
- ионное;
- плазмохимическое.

Из данного перечня наибольшее применение для целей формообразования нашли анизотропное жидкостное травление и, в меньшей мере, изотропное жидкостное и электрохимическое травление. Положительной чертой жидкостного травления является то, что они не требуют, в отличие от плазмохимического и электрохимического травления, сложной аппаратуры и оснастки.

При формообразовании деталей и узлов из анизотропных материалов, в отличие от изотропных, необходимо учитывать не только химический состав компонентов травителя, температуру,

концентрацию, время травления, но и различные скорости травления в разных кристаллографических направлениях, определяющих выделение и удаление тех или иных плоскостей граней и ребер фигур травления.

Таким образом, при анизотропном травлении необходимо учитывать:

- кристаллографическую ориентацию поверхностей;
- скорость и направление травления плоскостей выбранным травителем;
- иметь данные по составу травителя и технологическим режимам травления, обеспечивающим наилучшее качество поверхности;
- иметь диагностические критерии и аппаратное обеспечение, позволяющие осуществлять контроль процесса формообразования.

Развитие ПТЧЭ датчиков давлений привело к необходимости формирования трехмерных структур. Практика показывает, что в этих случаях необходимо учитывать анизотропию полупроводниковых материалов: эффекты бокового растравления под маской, выявление граней преимущественного травления. Без учета указанных и ряда других факторов невозможно формирование работоспособных полупроводниковых приборов и структур с требуемыми техническими характеристиками.

Многие жидкостные и газовые травители имеют изотропный характер травления, что не позволяет их использовать для формирования прецизионных малогабаритных элементов. Выходом из этого положения является использование анизотропных травителей, селективно травящих конструктивный материал. При этом скорость травления будет также определена необходимым кристаллографическим направлением.

Контроль за воспроизводимостью геометрии элементов и узлов микромеханики при травлении, необходимый для достижения определенной чувствительности и диапазона измерения интегрального преобразователя, не всегда возможен. Это обусловлено замкнутостью и изолированностью процесса травления. Поэтому на практике для отработки технологии

создания нового прецизионного элемента общее время травления делят на некоторые этапы с определенными временными интервалами. После каждого этапа образцы извлекают из камер и измеряют их линейные размеры.

Таким образом, создание новой геометрии образца влечет за собой достаточно трудоемкий процесс, состоящий из ряда экспериментов, при которых изменяется геометрия маски, тип, концентрация и температура травителя, кристаллографическая ориентация пластины. Исходя из этого, разработка новых ПТЧЭ часто базируется на уже отработанных технологиях создания упругих и чувствительных элементов. Это приводит к не оправданно завышенной стоимости принципиально новых устройств. При этом используются типовые элементы и конструкции для новых ПТЧЭ, что обусловлено сложностью разработки новых технологических процессов и, как правило, это инициирует разработку более сложных схем коррекции, компенсации и согласования. При этом нарушается системный подход к изготовлению ПТЧЭ как изделий и устройств микросистемной техники.

Анизотропное травление характеризуется разной скоростью травления в различных кристаллографических направлениях. Для полного использования различия в скоростях травления в разных направлениях требуется два условия: подвергаемая травлению сторона должна быть установлена параллельно плоскости решетки, имеющей наибольшую скорость травления, а края маскируемых участков должны быть расположены параллельно другой плоскости решетки, имеющей пренебрежимо малую скорость травления. При этих условиях получаются рельефы с наклонными стенками, имеющими в сечении форму притупленного клина.

По мере развития процесса травления первоначально заданный размер становится уже и, таким образом, ширина рельефа точно определяется маской, через которую осуществлялось травление, а глубина – скоростью травления.

Травление заканчивается в тот момент, когда наклонные стенки рельефа сходятся в ребре образуемого ими двугранного угла (когда карман в окисной пленке имеет геометрию полосы), в точке (когда карман в окисной пленке имеет геометрию

квадрата), или когда пластинка окажется протравленной насквозь в зависимости от того, что произойдет раньше.

На рис. 3.25 представлена объемно-графическая модель элементарной кубической ячейки решетки кремния с соответствующей ориентацией направлений $[100]$ относительно этой решетки.

Анализируя представленную модель видно, что точки пересечения не поддающихся травлению плоскостей $\{111\}$ с плоскостями $\{100\}$ (поверхностью пластины) взаимно перпендикулярны и лежат вдоль направлений $\langle 110 \rangle$. При условии, что окно в маске (например, прямоугольное или квадратное) точно подогнано с исходным направлением плоскости (направление $[110]$), только $\{111\}$ плоскости будут выдвинуты как боковые стенки в самом начале травления.

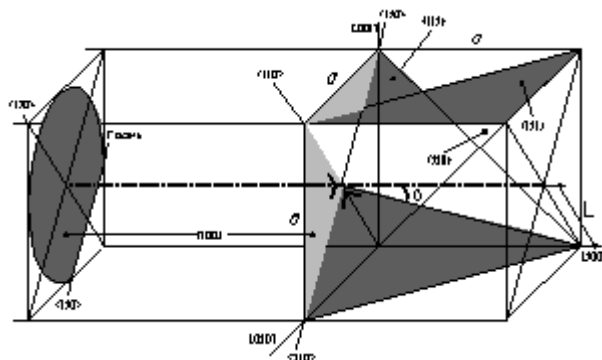


Рис. 3.25. Кремниевая пластинка ориентации (100) и соответствующие плоскости относительно элементарной кубической ячейки

В течение травления усеченная пирамида (при использовании квадратной маски) или V-образный усеченный желоб (при использовании прямоугольной маски) углубляются, но не становятся шире. Края в этих структурах – это $\langle 110 \rangle$ направления, ребра – $\langle 211 \rangle$ направления, боковые стенки – $\{111\}$ плоскости и дно – (100) плоскость, параллельная поверхности пластины. После продолжительного травления совокупность плоскостей $\{111\}$ обнажается по направлению к их общим точкам пересечения, и нижняя плоскость (100) исчезает, создавая

пирамидальную углубление (в случае использования квадратной маски) или V-образный желоб (прямоугольная маска), как показано на рис. 3.26.

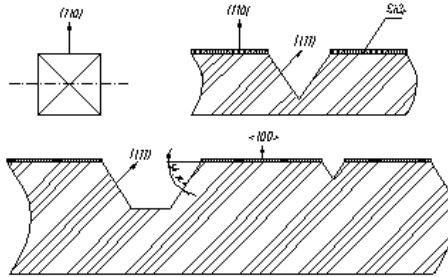


Рис. 3.26. Схематичное изображение вытравленных элементов в случае использования квадратной маски

Для вскрытия окна в маске с произвольными геометрией и ориентацией, например, круглой, и для достаточно долгого времени травления, анизотропно вытравленная полость в пластине ориентации $\{100\}$ — это пирамидальная полость с основанием, полностью описывающим круговое окно в маске. Выпуклые углы ($>180^\circ$) в окне маски всегда будут полностью подтравливаться после продолжительного времени травления. Это может быть невыгодно, когда необходимо создавать структуры меза-типа, но являться преимуществом при подтравливании суспендированных консолей или перемычек. Наклон боковых стенок в перпендикулярном сечении к поверхности пластины и к грани пластины определен углом α , как показано на рис. 3.25, описывая наклонный угол точек пересечения боковой стенки (111) и крестообразно расположенной плоскостью (110) , и численно равен:

$$\tan \alpha = \frac{L}{a}, \quad (3.26)$$

где $L = a \frac{\sqrt{2}}{2}$, или $\alpha = \arctan \frac{\sqrt{2}}{2} = 35,36^\circ$, или $54,74^\circ$ для комплементарного угла.

Допустимый предел (отклонение) на этом наклоне определен точностью совмещения поверхности пластины с

относительно плоскости (100). Обычно он составляет значение $0,5^\circ$, что является приемлемым для изготовления ПТЧЭ датчиков давлений.

Ширина нижнего отверстия W_o показанная на рис. 3.27, регулируется направлениями $\langle 110 \rangle$ и полностью определяется глубиной травления z , окном в маске W_m и определенным наклоном боковых стенок:

$$W_o = W_m - 2\cotan(54,74^\circ), \quad \text{или} \quad (3.27)$$

$$W_o = W_m - \sqrt{2}z \quad (3.28)$$

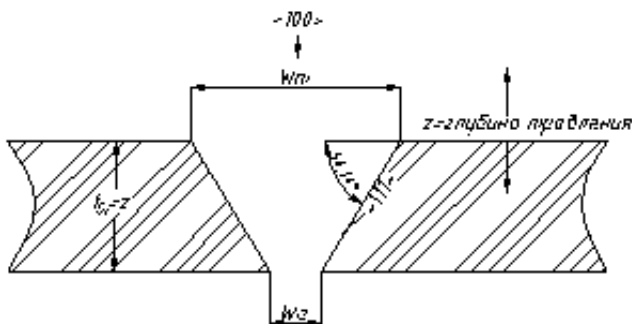


Рис. 3.27. Отношение ширины дна отверстия с шириной окна в маске

Соответственно, чем больше окно в маске, тем глубже точка, на которой пересекаются боковые стенки $[111]$ углубления. Остановка травления на пересечении боковых стенках $[111]$ происходит тогда, когда глубина травления составляет значение $1/\sqrt{2}$ от размеров окна маски.

Углы в анизотропно вытравленном углублении определены пересечением кристаллографических плоскостей и результирующий радиус закругления вершины по существу равен нулю. Это предполагает, помимо точного определения размера кремниевой мембраны, наличие значительного коэффициента концентрации напряжений.

На рис. 3.28 с помощью объемно-графической модели показана возможность получения вертикальных боковых стенок вместо стенок с наклоном в $54,7^\circ$, используя кремний с ориентацией $[100]$.

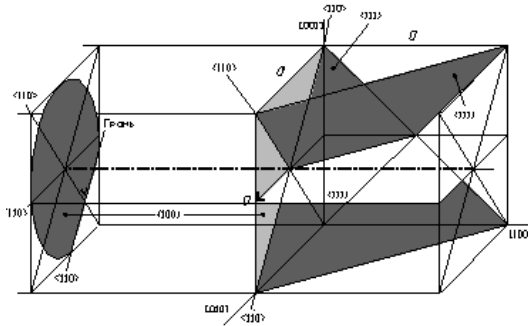


Рис. 3.28. Пластина кремния $[100]$ с элементами совмещенной маски $[100]$, представляющая вертикальные боковые стенки

Существуют плоскости ориентации $\{100\}$, перпендикулярные поверхности пластины, причем направления $\langle 100 \rangle$ являются их точками пересечения с поверхностью пластины. Эти направления образуют угол 45° с гранью пластины (то есть направления $\langle 110 \rangle$). Ориентируя окно в маске с направлениями $\langle 100 \rangle$, первоначально выделяются грани $\{100\}$, являющиеся боковыми стенками. Плоскости $\{110\}$ травятся быстрее, чем $\{100\}$, кроме того, они не выделяются. Так как нижняя и боковая поверхности представляют совокупность $\{100\}$ плоскостей, боковое подтравливание уравнивает скорость травления по вертикали и прямоугольные выемки, ограниченные более медленным травлением $[100]$ плоскостей.

Так как верхняя часть выемок подвергается травлению дольше, чем нижняя часть, то можно ожидать, что выемки будут шире в верхней части, чем в нижней. Однако это не так. Предположим, что ширина окна в маске равно W_m . При заданной глубине травления внутрь пластины нижележащий кремний будет защищен не маской W_m , а линией пересечения ранее сформированными гранями $\{100\}$ с поверхностью нижней части.

Ширина этой новой маски больше, чем первоначальная маска W_m , которая подтравливается. Примем за W_z эффективную ширину маски на глубину травления z . Отношение между W_m и W_z представлено боковой скоростью травления грани $\{100\}$ и временем, в течение которого грань была подвергнута травлению на глубину z :

$$W_z = W_m + 2R_{xy}\Delta t_z, \quad (3.29)$$

где R_{xy} – степень бокового подтравливания (скорость травления в плоскости x - y); Δt_z – время травления на глубину z .

Подтравливание U_z , вызванное окном в маске W_z определяется как:

$$U_z = TR_{xy} - R_{xy}\Delta t_z, \quad (3.30)$$

де T – общее время травления.

Ширина вытравленного углубления определяется как:

$$W_{tot} = W_z + 2U_z = W_m + 2TR_{xy}, \quad (3.31)$$

или, т. к. T может быть определена как измеренная общая поделенная на скорость вертикального травления R_z , выражение (1.30) может быть переписано как:

$$W_{tot} = W_m + (R_{xy} \frac{R_{xy}}{R_z}), \text{ или, так как } R_{xy} = R_z, \quad (3.32)$$

$$W_{tot} = W_m + 2z \quad (3.33)$$

Таким образом, ширина вытравленного углубления равна ширине фотолитографической маски плюс глубина травления, умноженная на два, а стенки остаются вертикальными в независимости от глубины травления.

При достаточно долгом времени травления грани $\{111\}$ постепенно принимают вид граней $\{100\}$. Эти внутренние наклонные грани $\{111\}$ вначале выявляются на углах прямоугольной маски и становятся больше за счет вертикальных боковых стенок до тех пор, пока последние окончательно не исчезнут.

Конечная форма угла травления в значительной степени определяется формой углов меза-структуры. На основе кинематической модели анизотропного травления, т. е. представления о том, что травление различных кристаллографических плоскостей происходит с различными скоростями и независимо друг от друга, что огранка фигур травления зависит от того, какая поверхность травления «выпуклая» или «вогнутая», и от соотношения скоростей травления различных кристаллографических плоскостей и их взаимного расположения, можно предложить методику расчета формы углов меза-структуры и получить условия образования различных форм улов. Углы меза-структуры могут быть образованы несколькими гранями, образуя сложной многогранную фигуру. С практической точки зрения наиболее интересными участками улов меза-структуры являются места пересечения граней угла друг с другом и с боковыми гранями $\{111\}$ стороны меза-структуры на поверхности пластины и на дне лунки травления. При расчете конечной формы углов меза-структуры следует рассчитать положение этих точек относительно вершины прямого угла защитной маски для травления для одной из возможных форм улов меза-структуры (рис. 3.29).

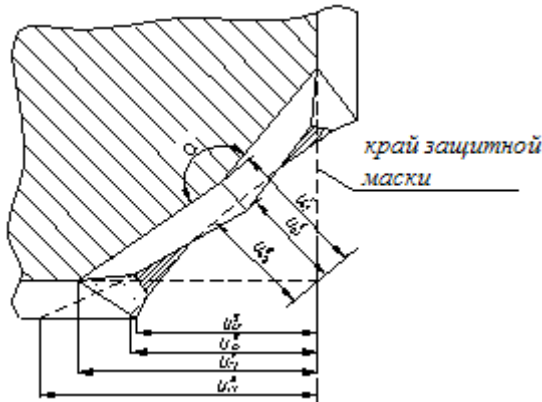


Рис. 3.29. Положение точек пересечения граней угла друг с другом и с боковыми гранями $\{111\}$ сторон меза-структуры относительно вершины прямого угла маски на поверхности пластины и на дне лунки травления для одной из возможных форм улов меза-структуры

Положение этих точек относительно вершины прямого угла защитной маски для травления определяется следующим образом:

$$U_{\alpha}^n = \frac{R_i}{\cos \beta_i \sin(\gamma_i + 45^\circ)} = \frac{R_i}{\cos \beta_i \sin \frac{\alpha_i}{2}}, \quad (3.34)$$

$$U_{\alpha}^g = \frac{R_i - R_{100} \sin \beta_i}{\cos \beta_i \sin(\gamma_i + 45^\circ)} = \frac{R_i - R_{100} \sin \beta_i}{\cos \beta_i \sin \frac{\alpha_i}{2}}, \quad (3.35)$$

$$U_c^n = \frac{R_i}{\cos \beta_i \sin \gamma_i} = \frac{R_{111}}{\cos 35^\circ 16'} (\operatorname{ctg} \gamma_i + 1), \quad (3.36)$$

$$U_c^g = \frac{R_i}{\cos \beta_i \sin \gamma_i} - \frac{R_{111}}{\cos 35^\circ 16'} (\operatorname{ctg} \gamma_i + 1) + \frac{\operatorname{tg} 35^\circ 16' \cos \gamma_i - \operatorname{tg} \beta_i}{\sin \gamma_i}, \quad (3.37)$$

где U_{α}^n и U_{α}^g – получающиеся в результате травления за единицу времени расстояния от вершины прямого угла защитной маски для травления до точек пересечения граней угла друг с другом на поверхности пластины и на дне лунки травления соответственно;

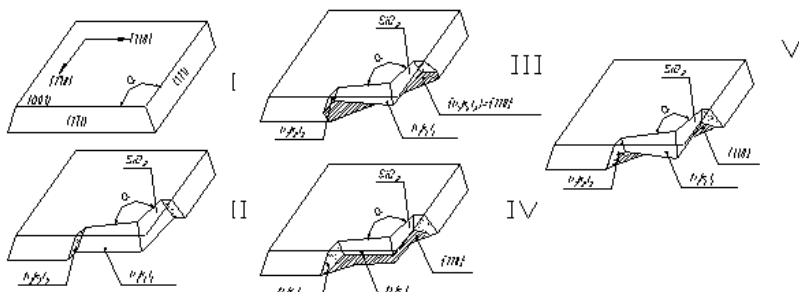


Рис. 3.30. Различные наблюдаемые формы углов меза-структуры

U_c^n и U_c^g – получающиеся в результате травления за единицу времени расстояния от вершины прямого угла защитной

маски для травления до точек пересечения граней угла с боковыми гранями $\{111\}$ сторон меза-структуры на поверхности пластины и на дне лунки травления соответственно;

R_i – скорость травления граней угла $\{h_i k_i l_i\}$;

R_{100} и R_{111} – скорость травления плоскостей (100) и (111) соответственно;

β_i – угол между гранью угла $\{h_i k_i l_i\}$ и перпендикуляром к поверхности пластины (100);

γ_i – угол между направлением $\langle 110 \rangle$ и следом грани угла $\{h_i k_i l_i\}$ на поверхности пластины (100).

Для любой конкретной формы углов меза-структуры каждая из этих величин определяется параметрами тех граней угла $\{h_i k_i l_i\}$, в результате пересечения которой друг с другом или с боковыми гранями $\{111\}$ меза-структуры образуются эти точки. Например, для формы углов, представленной на рис. 3.30 (II), величины U_α^n и U_α^g определяются параметрами граней $\{h_1 k_1 l_1\}$, а величины U_c^n и U_c^g параметрами граней $\{h_2 k_2 l_2\}$.

Тогда для данной формы угла соответствующие величины U обозначаются так:

$$U_{\alpha 1}^n, U_{\alpha 1}^g, U_{c 2}^n, U_{c 2}^g.$$

По аналогии семейство граней $\{110\}$ назовем множеством 3. Тогда для формы улов, представленной на рис. 3.30 (III), соответствующие величины U можно записать следующим образом:

$$U_{\alpha 1}^n, U_{\alpha 1}^g, U_{c 2}^n, U_{c 3}^g.$$

Назовем множество граней $\{h_1 k_1 l_1\}$ множеством 1, а множество граней $\{h_2 k_2 l_2\}$ множеством 2.

Для каждой грани, образующей угол, независимо от того, определяет она положение всех этих граничных точек в действительности или нет, можно вычислить значения величин U и геометрическим путем найти положения этих точек, как показано на рис. 3.29. Из рисунка видно, что для каждой конкретной формы угла существуют определенное соотношение между этими величинами для всех граней, образующих углы

меза-структуры, и наоборот – каждому определенному соотношению между этими величинами для всех граней, образующих углы, соответствует конкретная форма улов. Для экспериментально полученных форм улов меза-структуры выполняются следующие соотношения:

$$\begin{cases} U_{\alpha 1}^n = \min\{U_{\alpha i}^n\}, \\ U_{\alpha 1}^g = \min\{U_{\alpha i}^g\}, \\ U_{c 2}^n = \min\{U_{c i}^n\}, \\ U_{c 2}^g = \min\{U_{c i}^g\}, \end{cases} \quad (3.38)$$

$$\begin{cases} U_{\alpha 1}^n = \min\{U_{\alpha i}^n\}, \\ U_{\alpha 1}^g = \min\{U_{\alpha i}^g\}, \\ U_{c 2}^n = \min\{U_{c i}^n\}, \\ U_{c 3}^g = \min\{U_{c i}^g\}, \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\begin{cases} U_{\alpha 1}^n = \min\{U_{\alpha i}^n\}, \\ U_{\alpha 3}^g = \min\{U_{\alpha i}^g\}, \\ U_{c 2}^n = \min\{U_{c i}^n\}, \\ U_{c 2}^g = \min\{U_{c i}^g\}, \end{cases} \quad (3.40)$$

$$\begin{cases} U_{\alpha 1}^n = \min\{U_{\alpha i}^n\}, \\ U_{\alpha 1}^g = \min\{U_{\alpha i}^g\}, \\ U_{c 2}^n = \min\{U_{c i}^n\}, \\ U_{c 2}^g = \min\{U_{c i}^g\}, \end{cases} \quad (3.41)$$

Условие (3.38) соответствует форме углов, показанной на рис. 3.30 (II), условие (3.39) – форме углов, представленной на рис. 3.30 (III), условие (3.40) – форме улов, представленной на рис. 3.30 (IV), условие (3.41) – форме углов, представленной на рис. 3.30 (V).

Эти соотношения можно рассматривать как условия образования данных форм углов квадратной меза-структуры, так как с их помощью устанавливаются количественные соотношения между параметрами различных граней угла,

гарантирующие образование данной формы угла, что будет рассмотрено далее при разработке топологии фотошаблона по формированию профиля.

3.7.2. Вопросы управления формированием структур методом анизотропного травления

Для анизотропного травления используются большое разнообразие травителей. Однако для практического применения при изготовлении мембраны типового ПТЧЭ, в т. ч. методом «стоп-травления», используется водный раствор гидроксида калия (KOH) определенной концентрации и водный раствор этилендиамина (ЭДМ) ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$), обладающие различными свойствами. Все эти составы содержат окислитель, который при взаимодействии с кремнием образует SiO_2 и комплексообразующий реагент, взаимодействующий с SiO_2 и образующий растворимый комплексный ион и воду. Типичный набор графиков Аррениуса для $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ при травлении кремния в водном растворе ЭДМ показаны на рис. 3.31.

Из рисунка видно, что температурная зависимость скорости травления большая и что крутизна различается для различных плоскостей, т. е. $(111) > (100) > (110)$. Более низкие энергии активации в графиках Аррениуса соответствуют более высоким скоростям травления. Коэффициент анизотропии k равен [58]:

$$k = \frac{(hkl)_1 v}{(hkl)_2 v}, \quad (3.42)$$

где $(hkl)_{1,2} v$ – скорость травления для различных плоскостей.

Коэффициент анизотропии равен 1 для изотропных травителей и 400/200/1 для $(110)/(100)/(111)$ 50 % водн. р-р KOH при температуре 95 °C. В общем, энергии активации скоростей травления ЭДМ меньше, чем в KOH. (111) плоскость всегда травится медленнее, но последовательность скорости травления для плоскостей (100) и (110) может быть изменена на противоположную, например, 50/200/8 в 55 % водном растворе ЭДМ при 85 °C. Плоскость (110) травится в восемь раз медленнее,

а (111) в восемь раз быстрее в КОН, чем в ЭДМ, в то время как (100) травится с такой же скоростью. Работа со спиртами и другими органическими добавками часто изменяет относительную скорость травления различных кремниевых плоскостей. Например, уменьшение скорости травления добавлением изопропилового спирта в раствор КОН составляет 20 % для $\langle 100 \rangle$, и почти 90 % для $\langle 110 \rangle$. Как результат более сильного уменьшения скорости травления на поверхности (110), скорость травления (100):(110) реверсирована.

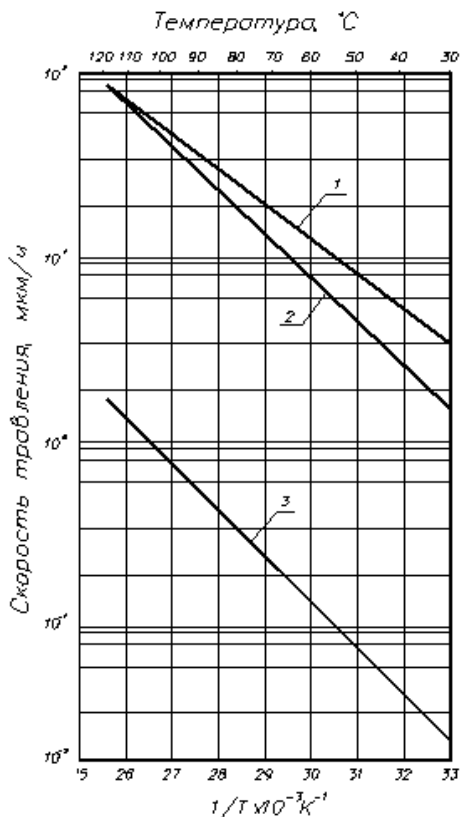


Рис. 3.31. Скорость травления в ЭДМ как функция температуры для кремния различной ориентации:

1 – $\langle 110 \rangle$, $E_a = 0,33$ эВ; 2 – $\langle 100 \rangle$, $E_a = 0,4$ эВ; 3 – $\langle 111 \rangle$, $E_a = 0,52$ эВ

Следует отметить, что неточное совмещение фотошаблона при проведении фотолитографии будет изменять скорость травления, например рассовмещение на один градус на направлении [111] может увеличивать скорость травления на поверхности (111) приблизительно на 300 %.

Обобщенные характеристики КОН и ЭДМ приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Травитель (температура)	Концентрация бора, обеспечивающая «стоп-травление» (коэффициент уменьшения скорости травления при данной концентрации)	Скорость травления	Коэффициент травления	Маска
ЭДМ (96°C)	$N > 8 \cdot 10^{19}$ (100)	1,2	35 для (100)/(111)	SiO_2 (2-5 Å/мин., Si_3N_4 (1 Å/мин.)
КОН (96°C)	$N > 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (20)	2,4	400 для (100)/(111) и 600 для (110)/(111)	SiO_2 (28 Å/мин., Si_3N_4 (1 нм/мин.)

Иерархия скоростей травления для водного раствора ЭДМ следующая – (110)>(411)>(311)>(511)>(211)>(100)>(331)>(221)>(111).

Скорость травления кремния как функция концентрации КОН показана на рис. 3.32.

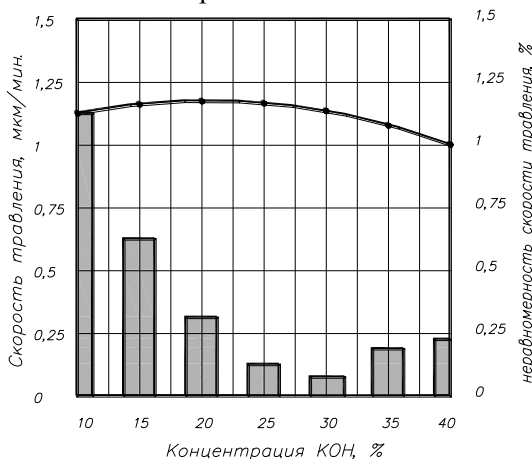


Рис. 3.32.
Скорость травления кремния (линия) и неравномерность скорости травления (столбцы) как функции концентрации водного раствора КОН

На рис. 3.33 показаны зависимости скорости травления двуокиси кремния, которая применяется в технологии в качестве защитной маски, от концентрации травителя КОН при различной температуре.

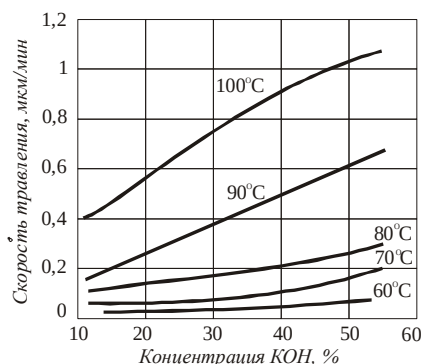


Рис. 3.33. Зависимость скорости травления двуокиси кремния от концентрации и температуры водного раствора КОН

Из графика следует, что скорость травления SiO_2 возрастает с увеличением температуры и концентрации травителя.

Далее рассмотрим характерные технологические особенности и режимы анизотропного травления, в т. ч. и с позиций обеспечения адекватности формируемых элементов.

Математическая модель процесса травления, в общем виде, может быть представлена как:

$$V_{\text{тр}} = \frac{k_{\text{диф}} \cdot k \cdot e^{-E/KT}}{k_{\text{диф}} + k \cdot e^{-E/KT}} \cdot C; \quad (3.43)$$

где $V_{\text{тр}}$ – скорость травления; k – константа скорости химической реакции; E – энергия активации реакции травления; $K_{\text{диф}}$ – коэффициент пропорциональности диффузионного процесса; C – концентрация травителя.

В зависимости от лимитирующей стадии в процессе травления (хим-реакция на поверхности, диффузия реагентов в

поверхностный слой, адсорбция реагентов, десорбция продуктов реакции) имеют место два случая:

1 $k_{\text{диф}} \ll e^{-E/kT}$, тогда $V_{\text{тр}} = k_{\text{диф}} \cdot C$ – травление в данном случае является полирующим и не зависит от E .

2 $k_{\text{диф}} \gg e^{-E/kT}$, т. е. $V_{\text{тр}} = k_{\text{диф}} \cdot C \cdot e^{-E/kT}$, в этом случае $V_{\text{тр}}$ существенно зависит от энергии активации.

В свою очередь, E зависит от кристаллографической ориентации поверхности, и характер проявления будет анизотропным, т. е. $V_{\text{тр}}$ будет не скаляром, как в первом случае, а вектором. При анизотропном травлении кремния в растворе КОН большое значение имеет выбор технологических режимов травления и маскирующего покрытия.

При этом в первом случае характер травления будет изотропным, фронт травления будет равномерным, и избирательность будет отсутствовать.

Во втором же случае, травление будет иметь анизотропию, проявляющуюся в различии скоростей травления в том или ином направлении. Это явление объясняется в первую очередь различием в плотности упаковки атомов в монокристаллических полупроводниках. Поэтому при формировании внутренних фигур травления выявляются в первую очередь плоскости, которые имеют максимальную плотность атомов и, соответственно, минимальную скорость травления: плоскости (111) для кубической кристаллической решетки. Плоскости же с наименьшей плотности упаковки атомов, травятся с наибольшей скоростью (плоскости (100) для кремния). При формировании выпуклых фигур травления (меза-структур), наряду с плотноупакованными плоскостями (111), но с меньшей чем (100), указанными плоскостями являются плоскости (112), которые выявляются на углах маски.

Важной задачей при построении модели топологии фотошаблона является исключение процесса подтравливания защитной маски, возникающего из-за неточного совмещения маски и (или) из-за ограниченного травления плоскостей {111}. Увеличение канавки, ограниченной плоскостями {111} в кремнии (100) после травления в 25 % водном растворе КОН при

96 °С в течение времени 24 ч, равно 9 мкм. Наклоны боковых стенок v-образной канавки равен 54.74°, и фактическая скорость травления R , выраженная через расширение v-образной канавки R_v равна [58]:

$$R_{111} = \frac{1}{2} \sin(54,74^\circ) R_v, \text{ или} \quad (3.44)$$

$$R_{111} = 0,408 R_v, \quad (3.45)$$

где R_{111} – скорость травления, нм/мин; R_v – увеличение канавки, нм/мин.

На практике, для глубины травления 120 мкм, подтравливание маски составляет значение 0,9 мкм. Для v-образной канавки длиной 1 мм и рассовмещением 1°, общее подтравливание составит 18 мкм, причем 95% будут вызвано рассовмещением маски и только 5 % будет вызвано травлением боковых стен {111}.

Подтравливание маски, которая содержит выпуклые углы, намного больше, чем вышеназванное подтравливание, т. к. травитель имеет склонность описывать окно в маске полостями, ограниченными плоскостями {111}. Таким образом, необходимо избегать топологии фотошаблона с выпуклыми углами. В то же время, меза-структуры являются неотъемлемой частью в конструкции профилированных мембран ПТЧЭ. Существуют два пути, чтобы уменьшить подтравливание. Один – с помощью химических добавок, уменьшающих угол подрезания за счет уменьшенного анизотропного коэффициента, и другой – с помощью специальных масок, компенсирующих угол подтравливания за счет большей потери полезной площади.

При травлении прямоугольных выпуклых углов, происходит деформация граней, вызванная подтравливанием, что является неприемлемым для процесса формирования сложных профилированных мембран ПТЧЭ датчиков давления. Подтравливание является функцией времени травления и, таким образом, непосредственно связана с глубиной травления. Уменьшение подтравливания с помощью добавлений в травитель

химических добавок вызывает образование конусообразных бугорков, вызванное включениями углерода в составе травителя.

Подтравливание может быть уменьшено с помощью угловых компенсаторов, которые добавляются к углам на топологии маски, чтобы быть удаленными в процессе травления. В зависимости от состава травителя используются различные угловые квадратные и прямоугольные компенсаторы (рис. 3.34) [58].

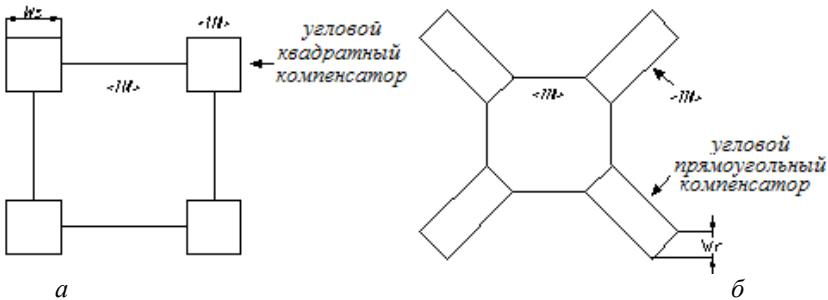


Рис. 3.34. Методы квадратных и прямоугольных компенсаторов

В случае угловой компенсации квадратами, к каждому углу квадратной маски добавляется дополнительный квадрат (см. рис. 3.34, а). И защитный окисел и квадратный компенсаторы параллельны направлению $\langle 110 \rangle$. В этом случае углы защитного окисла предохраняются от подтравливания. Три выпуклых «жертвенных» угла на защитном окисле подтравливаются в бок областями быстрого травления в течении всего процесса. Величина W_s зависит от глубины травления и для 120 мкм составляет значение 120 мкм. На рис. 3.34, б показан прямоугольный угловой компенсатор, расположенный в каждом углу маски, причем величина W_r должна быть вдвое больше толщины пластины. Четыре стороны квадрата расположены вдоль направлений $\langle 110 \rangle$, а прямоугольные компенсаторы повернуты на 45° длинными сторонами вдоль направлений $\langle 100 \rangle$. Защитная маска постоянно вытесняется, одновременным травлением с передней и задней сторон. Основным недостатком использования угловых компенсаторов – это необходимость большого пространства вокруг углов, что делает топологию защитной маски менее компактным, что в свою очередь

ограничивает построение миниатюрных ПТЧЭ, содержащих профилированную мембрану со сложным рельефом. Однако этот недостаток может быть устранен комбинированным использованием нескольких различных компенсаторов (рис. 3.35) [58].

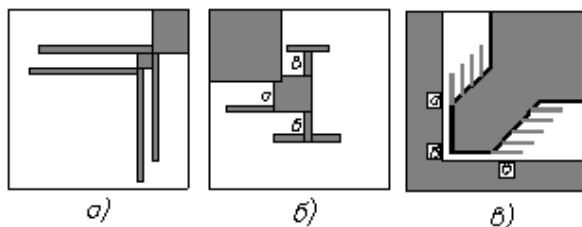


Рис. 3.35. Топологии фотошаблонов для вариантов по использованию различных компенсаторов

Для моделирования размеров и форм масок при проведении травления необходимо установить плоскости, выявляющиеся на выпуклых углах в течение процесса травления в КОН (рис. 3.36, см. также рис. 3.37) [58].

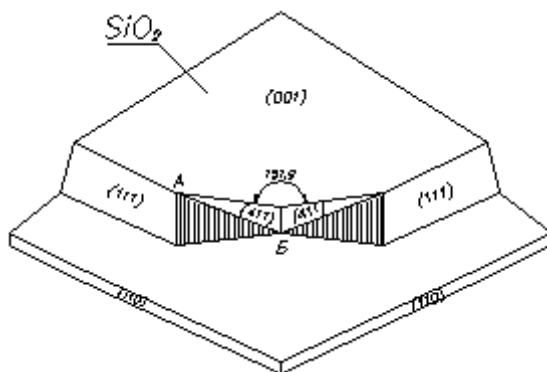


Рис. 3.36. Плоскости, возникающие на выпуклых углах в процессе травления

Подтравливание выпуклых углов в 25 % водном растворе КОН определяется исключительно плоскостями {411}. Неровные поверхности, где могут быть выявлены только части главных

плоскостей, перекрывают плоскости $\{411\}$ под диагональной линией АБ. Коэффициент травления от $\{411\}$ до $\{100\}$ не зависит от температуры в интервале от 60 до 100 °С. Эта величина сильно уменьшается с увеличением концентрации КОН от 1,6 для 15 % КОН до 1,3 для 40 %, когда кривая выравнивается. Чтобы избежать неровной поверхности и добиться хорошего выявления плоскостей, на выпуклых углах применяют прямоугольный компенсатор, показанный на рис. 3.37.

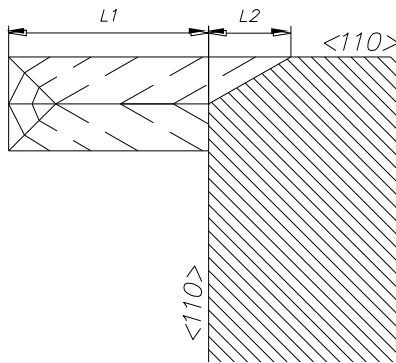


Рис. 3.37. Прямоугольный угловой компенсатор $\langle 110 \rangle$

Быстрое травление плоскостей $\{411\}$, начинающееся на двух выпуклых углах, горизонтально подтравливает прямоугольник с ориентацией $\langle 110 \rangle$ (пунктирная линия на рис. 3.37). Очевидно, что чем длиннее этот прямоугольник, дольше защищен выпуклый угол от подтравливания. К концу травления прямоугольник полностью исчезает, сохраняя минимальную неровность поверхности на выпуклом крае. С другой стороны, полное стравливание компенсатора приводит к скашиванию кромки на лицевой поверхности выпуклого угла. Геометрические размеры компенсатора с ориентацией $\langle 110 \rangle$ определяются исходя из глубины травления, коэффициента скорости травления $\{411\}/\{100\}$ и концентрации КОН:

$$L = L_1 - L_2 = 2H \frac{R\{411\}}{R\{100\}} - \frac{B_{\langle 110 \rangle}}{2 \tan(30,9^\circ)}, \quad (3.46)$$

где H – глубина травления; $B_{\langle 110 \rangle}$ – ширина прямоугольника с ориентацией $\langle 110 \rangle$; R – коэффициент скорости травления; $\tan(30,9^\circ)$ – геометрический фактор.

Коэффициент 2 – первый член уравнения, получаемый из скорости травления плоскости $\{411\}$, который определен нормалью к этой плоскости и должен быть преобразован в направление $\langle 110 \rangle$. Второй член уравнения учитывает, что прямоугольнику $\langle 110 \rangle$ необходимо полностью исчезнуть ко времени, когда будет достигнут выпуклый угол. Окончательное скашивание кромки на рис. 3.37 может быть уменьшено дальнейшим изменением структуры компенсатора. Это делается, замедляя травление передней стороны, которая в значительной степени определяет угловое подтравливание. Например, возможно создание более вогнутых форм непосредственно перед выпуклым углом (см. рис. 3.35, а). Разделение компенсаторов создает подобное распределение и с их помощью достигается более симметричная конечная структура, уменьшается скашивание кромки на угле от 1,4 до 2 раз, а также происходит скашивание углов до 45° .

Угловые квадратные компенсаторы $\langle 110 \rangle$ характеризуются более высокими требованиями пространства, чем прямоугольные. Для моделирования из размеров, можно использовать известную формулу (см (3.46)), где L_1 – половина длины стенки квадрата. Все быстро травящиеся плоскости должны достичь выпуклого угла в одно и то же время. Аналогично прямоугольным компенсаторам, требования пространства могут быть уменьшены за счет объединения с прямоугольными $\langle 110 \rangle$ компенсаторами (см. рис. 3.35, б). Три выпуклых угла квадратных компенсаторов защищены от подтравливания добавочными прямоугольниками. При моделировании размеров таких структур учитывают конечные размеры ПТЧЭ, а также тот факт, что боковой прямоугольник на угле (б) должен быть на 30 % длиннее, чем другие боковые прямоугольники. В этом случае угол формируется травлением передних стенок, которое начинается на углах (а) и (б) (см. рис. 3.35, б).

Недостатком известных схем компенсации является невозможность достижения точного угла на нижней и верхней частях выпуклого края, из-за неровностей поверхности, связанных с плоскостями $\{411\}$.

Вариантом по устранению этого недостатка является схема компенсации, в которой выпуклый угол формируется двумя плоскостями $\{111\}$ (см. рис. 3.35, в). Топология фотошаблона в данном случае использует группы ребер $\langle 010 \rangle$, которые добавляются к выпуклым углам в направлении $\langle 100 \rangle$. Эти ребра будут подрезаться в процессе травления вертикальными плоскостями $\{100\}$ с обеих сторон.

Ширина этих ребер должна быть вдвое больше, чем глубина травления. Эти ребра могут или связывать два противоположных угла и совместно защищать их от подтравливания, или они могут быть добавлены к отдельным выпуклым углам (открытые ребра) (рис. 3.38).

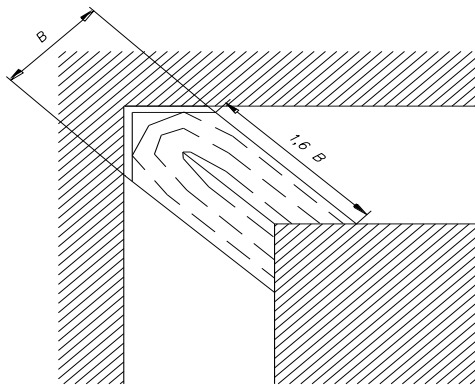


Рис. 3.38. Метод компенсации с помощью открытых ребер

С помощью метода открытых ребер чрезвычайно важно, чтобы плоскости $\{100\}$ достигали угла быстрее, чем плоскости $\{411\}$. Для этой цели ребра должны быть достаточно широки, чтобы избежать полного подрезания за счет окружения плоскостями $\{411\}$ с передней стороны, перед тем, как они полностью подтравятся за счет окружения плоскостями $\{100\}$. Например, для 33 % водного раствора КОН соотношение между длиной ребер и их шириной должно быть 1,6.

Длина ребер со сторонами $\langle 110 \rangle$ определяется как:

$$L_{\langle 110 \rangle} = (H - \frac{B_{\langle 010 \rangle}}{2}) \frac{R\{411\}}{R\{100\}}, \quad (3.47)$$

где H – наибольшая глубина травления; $B_{\langle 010 \rangle}$ – ширина прямоугольника с ориентацией $\langle 010 \rangle$; R – коэффициент скорости травления.

Анизотропные травители часто не обеспечивают требования по величине R_a поверхности мембраны и обычно применяются слабые изотропные травители для сглаживания неровностей. R_a может быть уменьшена увеличением концентрации КОН, как показано на рис. 3.39.

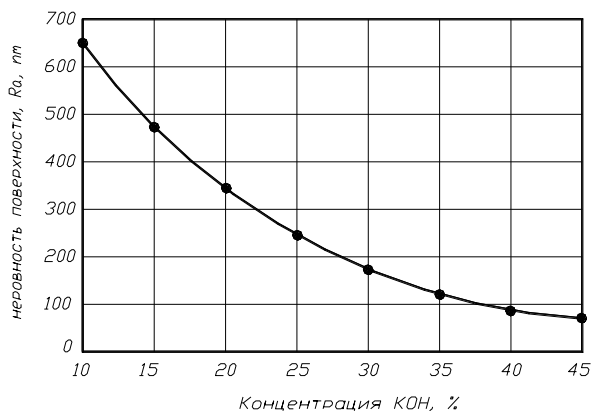


Рис. 3.39. Величина R_a как функция концентрации КОН для глубины травления 60 мкм

Так как различие скорости травления для разных концентраций КОН небольшое (см. рис. 3.32), предпочтительно использовать концентрированные растворы КОН (25–35 %) для получения гладкой поверхности на плоскостях с низкими индексами. Для высоконцентрированных растворов (>35 %) поверхностная неровность прямо пропорциональна времени травления. Это вызвано ростом пузырьков водорода, которые препятствуют перемещению свежего раствора к поверхности

кремния, вызывая «микромаскирование», которое приводит к образованию бугорков. Средняя неровность R_a сильно зависит от размешивания травителя. Перемешивание может уменьшить R_a на порядок, за счет более эффективного удаления пузырьков водорода от поверхности травления.

Различие между макрокопической и микрокопической неровностями показано на рис. 3.40.

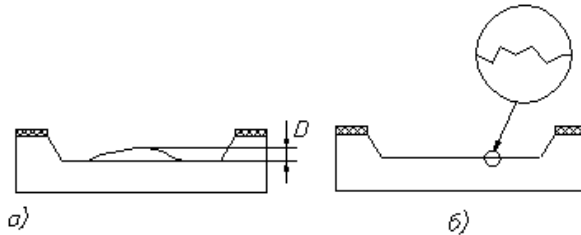


Рис. 3.40. Виды дефектов поверхности мембран:

а) – макрокопическая неровность (нотчинг);

б) – микрокопическая неровность

Макрокопическая неровность (образование провалов или образование выступов), имеет место, когда центры незащищенных областей травятся медленнее, чем границы этих зон, так, что выделяются углы между боковыми стенками и нижележащей плоскостью (100). Мембраны, таким образом, становятся тем тоньше, чем ближе к краям. Различие по толщине может достигать 1–2 мкм, что является значительным, если средняя толщина не превышает значение 10 мкм. Образование провалов увеличивается линейно с увеличением глубиной травления, но уменьшается с увеличением концентрации КОН. Микрокопическая гладкость первоначально зеркально полированной поверхности может быть также ухудшена до микрокопической неровности.

3.8. Метод формирования полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков абсолютного давления

Одним из заключительных этапов формирования ПТЧЭ является анодное соединение кремния и стеклянной подложки с

целью формирования вакуумированной полости (полости опорного давления).

Для решения этой задачи разработана и активно применяется технология электростатического соединения (ЭСС) полупроводников с диэлектриками и оборудование для его осуществления [83]. Использование ЭСС позволило применить принципиально новые конструкторско-технологические решения при проектировании датчиковой аппаратуры.

Механизм соединения с помощью ЭСС изображен на рис. 3.41.

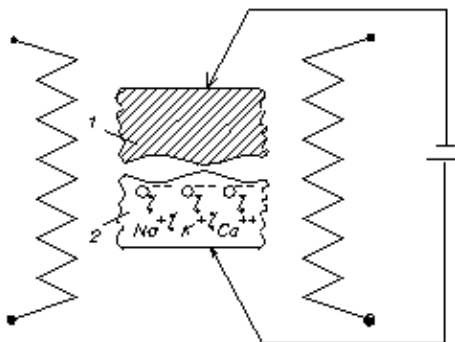


Рис. 3.41. Механизм электростатического соединения:

1 – кристалл; 2 – стекло

Две отполированные детали – стекло и кремниевый кристалл – приводят в тесное соприкосновение друг с другом.

Сборку нагревают до определенной температуры для придания изолятору электропроводности и подают напряжение постоянного тока. Оксиды щелочных металлов, содержащиеся в стекле, под воздействием высокой температуры и напряжения диссоциируют и мигрируют в толще стекла. При этом положительно заряженные ионы щелочных металлов электрически нейтрализуются в зоне отрицательного электрода. Освободившиеся отрицательно заряженные ионы кислорода концентрируются в точках соприкосновения стекла с положительно заряженным кремнием и образуют тонкий слой SiO_2 . В местах соприкосновения деталей создаются сжимающие электростатические силы, прямо пропорциональные квадрату

напряжённости электрического поля и способствующие образованию химической связи. Под воздействием электростатических сил площадь контакта кремний-стекло постоянно увеличивается до образования прочной связи по всей поверхности соединяемых материалов. Прочность образовавшегося соединения такова, что при попытке нарушить соединение разрушение идёт не по зоне соединения, а по соединённым материалам.

Процесс соединения протекает последовательно, проходя три стадии:

- сближение поверхностей до образования физического контакта;
- активация соединяемых поверхностей для протекания химического взаимодействия (обеспечивается нагревом и подачей напряжения);
- распространение объёмных эффектов взаимной диффузии: рекристаллизация и релаксация внутренних напряжений.

Основу процесса ЭСС составляет целый ряд физических и химических эффектов: эффект Джонсона-Раббека (электроадгезия); электролиз в твердой фазе и сопровождающая его миграционная поляризация в стекле; переключение кислородных связей, происходящих в окисленных поверхностных слоях соединяемых материалов; активация соединяемых поверхностей вследствие дислокации из объёма материала к поверхностным слоям.

Определяющие параметры процесса – температура и значение электропотенциала. Температура установления физического контакта определяется концентрацией подвижных ионов щёлочи, в свою очередь определяемой содержанием в стекле щелочных металлов и энергией активации их возбуждения.

На рис. 3.42 представлена циклограмма соединения кремния со стеклом.

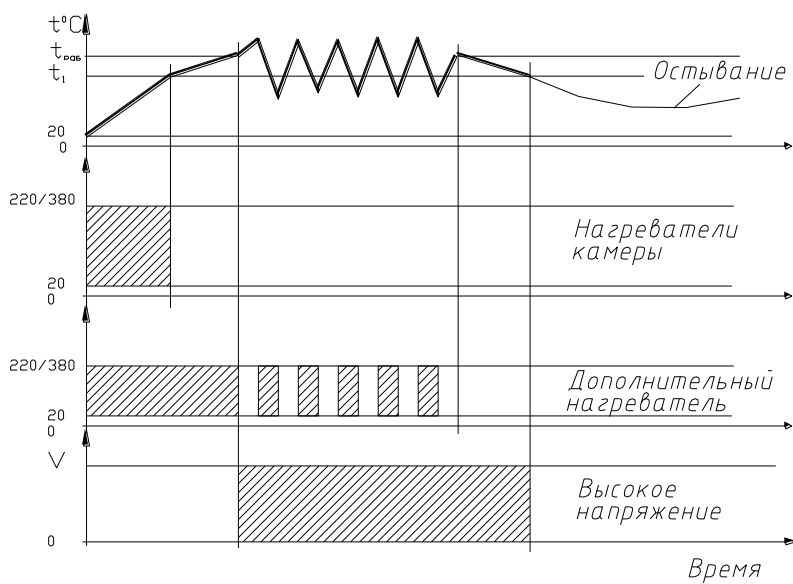


Рис. 3.42. Циклограмма соединения кремния со стеклом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полупроводниковая технология позволяет создавать датчики давлений на основе ППЧЭ с хорошими метрологическими характеристиками и низкой стоимостью, причем последняя имеет четко выраженную тенденцию к снижению. Высокое качество кремния и других материалов, применяемых в микроэлектронной технологии, обеспечивает производство датчиков давления с погрешностью измерений 0,02 %.

С другой стороны, низкая стоимость датчиков определяется прежде всего большим числом элементов, которые можно получить с одной пластины. Если кремниевая пластина имеет диаметр 100 мм, а размер ППЧЭ 1×1 мм, то с одной пластины можно получить около 6 000 элементов. Обычно технологические операции производятся не с одной пластиной, а с партией, содержащей 25 пластин. В результате после окончания технологического цикла производства из партии пластин можно получить до 15 000 ППЧЭ. Стоимость датчиков будет определяться индивидуальной сборкой, настройкой, испытаниями и метрологической аттестацией. При массовом производстве стоимость датчиков гражданского применения составляет от одного до нескольких долларов.

По этим причинам датчики на основе полупроводниковой технологии широко применяются в технике и научных исследованиях. Общий объем продаж датчиков в мире в 2007 г. составил 14 млрд. дол., и из них не менее 25 % приходится на долю датчиков, производимых по полупроводниковым технологиям.

В настоящее время из общего объема производства датчиков 40 % приходится на долю датчиков давления, 25 % – температуры, 13 % – ускорения, 9 % – потоков газа и жидкости, 5 % – силы, 8 % – остальные параметры.

Современные микроэлектронные системы, к которым напрямую относятся микроэлектронные датчики, представляют собой синтез конструкций и технологий, при котором технология выполняет, зачастую, главенствующую роль. Для устройств микросистемной техники конструкция изделия заложена в

технологической оснастке, в материалах, программах и технологических режимах формирования элементов и узлов. Классическим примером этого служит окисление кремния и термовакuumное осаждение металлических пленок, при которых, меняя режимы проведения технологических операций, можно варьировать такими конструктивными характеристиками, как твердость, диэлектрическая проницаемость, толщина изолирующих пленок, чувствительность и др.

Типовые технологии микроэлектроники строятся на последовательном чередовании структурных и топологических операций: а) нанесение на поверхность кремниевой пластины сплошных слоев диэлектрика, металла, введение легирующих примесей и т. п.; б) формирование из созданного на структурной операции слоя дискретных фрагментов заданной формы и расположения.

Для изготовления ПТЧЭ целесообразно использование модифицированных технологических приемов микроэлектроники с сохранением ее двух слоев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 А.с. 1486767. Способ настройки интегрального тензомоста с питанием от источника тока/ *Г. И. Лурье, В. М. Стучебников и др.* // Изобретения, 1989.

2 *Амбарцумян С. А.* Теория анизотропных пластин / *С. А. Амбарцумян.* – М.: Наука, 1967. – 266 с.

3 *Баринов И. Н.* Полупроводниковые чувствительные элементы датчиков давлений на основе структуры «кремний-на-диэлектрике»: Дис....канд. техн. наук: 05.11.14. – Защищена 22.12.05; Утв. 14.04.06; 15к/38. – Пенза. – 2005. – 212 с.

4 *Берри Р.* Тонкопленочная технология / *Р. Берри, П. Холл, М. Гаррис.* – М.: Энергия, 1972. – 336 с.

5 *Бидерман В. Л.* Прикладная теория механических колебаний / *В. Л. Бидерман.* – М.: Высш. шк., 1972. – 451 с.

6 *Бушев В. В.* Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА / *В. В. Бушев, О. Л. Николайчук, В. М. Стучебников* // Датчики и системы. – 2000. – № 1. – С. 21–27.

7 *Ваганов В. И.* Интегральные преобразователи / *В. И. Ваганов.* – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.

8 *Ваганов В. И.* Анализ чувствительности интегральных тензорезисторных преобразователей мембранного типа с учетом сдвигового пьезорезистивного эффекта / *В. И. Ваганов, А. Б. Носкин* // Электронная измерительная техника / Под ред. *А. Г. Филиппова.* – М.: Атомиздат. – 1980. – Вып. II. – С. 131–141.

9 *Виглеб Г.* Датчики. Устройство и применение / *Г. Виглеб.* – М.: Мир, 1989. – 246 с.

10 ГОСТ 22520–85. Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми сигналами ГСП. Общие технические условия.

11 *Готра З. Ю.* Технология микроэлектронных устройств: Справочник / *З. Ю. Готра.* – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.

12 *Гридчин В. А.* Физика микросистем: Учеб. пособие в 2 ч. Ч. 1/ *В. А. Гридчин, В. П. Драгунов* – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 416 с.

13 *Гридчин В. А.* Критериальный подход к выбору размещения тензорезисторов в интегральных тензопреобразователях / *В. А. Гридчин* // Известия Северо-

Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. – 1978. – № 2. – С. 12–15.

14 *Гридчин В. А.* Оптимизация параметров интегральных тензопреобразователей / *В. А. Гридчин* // Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. – М.: 1980. – С. 31.

15 Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник: в 3 т. / Под общ. ред. *Ю. Н. Коптева*; под ред. *Е. Е. Багдатьяна, А. В. Гориша, Я. В. Малкова*. – М. : ИПРЖР, 1998. – 512 с.

16 *Евдокимов В. И.* О коррекции аддитивной погрешности мостов с полупроводниковыми тензорезисторами/ *В. И. Евдокимов* // Тр. института. Сб. 88. – М. : НИИТеплоприбор, 1979. – С. 6–12.

17 *Игнатьева Е. В.* О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления/ *Е. В. Игнатьева, Ю. А. Михайлов* // Датчики и системы. – 2008. – № 10. – С. 35–37.

18 К 50-летию открытия пьезорезистивного эффекта. История и состояние развития пьезорезистивных датчиков // Экспресс-информация. – 2005. – № 23. – С. 2–8.

19 Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование : учеб. пособие для вузов / *Л. А. Коледов, В. А. Волков, Н. И. Докучаев и др.*; под ред. *Л. А. Коледова*. – М. : Высш. шк., 1984. – 231 с.

20 *Косоголов В. М., Федулов А. В., Соколов Е. Ю., Шлифер С. Э.* Технология диффузионной сварки полупроводниковых чувствительных элементов в электрическом поле // Приборы и системы управления. – 1991. – № 4.

21 *Курносоев А. И., Юдин В. В.* Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: Учеб. пособие для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые приборы». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 368 с., ил.

22 *Лурье Г. И.* Способ настройки интегральных тензомостов с питанием от источника стабилизированного тока / *Г. И. Лурье, В. М. Стучебников* // АС СССР № 1411571, 1988.

23 *Лехницкий С. Г.* Анизотропные пластинки/ *С. Г. Лехницкий*. – М.; Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – 355 с.

24 *Литовченко В. Г., Шаповалов В. П.* Исследование процессов геттерирования в кремнии // *Микроэлектроника* – Т. 17. – Вып. 4. – 1988 – С. 305.

25 *Лучко В. Е.* Термостабильные тензометрические преобразователи для датчиков давления/ *В. Е. Лучко, Е. М. Сычугов* // *Датчики и системы*. – 2000. – № 11–12. – С. 25–27.

26 *Мартынов Д. Б.* Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС/ *Д. Б. Мартынов, В. М. Стучебников* // *Датчики и системы*. – 2002. – № 10. – С. 6–12.

27 Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. Под ред. *Р. Бургера и Р. Донована*. // Пер. с англ. под ред. *В. Н. Мордковича, Ф. П. Пресса*. – М.: Мир, 1969. – 451 с., ил.

28 ОСТ 107.460084.200–88. Микросборки. Общие требования и нормы конструирования.

29 ОСТ 92-4279–80. Преобразователи измерительные. Методика определения метрологических характеристик.

30 ОСТ 92-1729-88 Элементы чувствительные полупроводниковые преобразователей механических величин. Общие требования к типовым технологическим процессам изготовления.

31 ОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.

32 Полупроводниковые тензодатчики / под ред. *М. Дина*. – М.; Л.: Энергия, 1985. – 213 с.

33 *Распопов В. Я.* Принципы построения датчиков давления и топология тензорезисторов/ *В. Я. Распопов* // *Датчики и системы*. – 2007. – № 2. – С. 22–26.

34 *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы: Учеб. пособие/ *В. Я. Распопов*. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

35 *Рыбаков М. М.* Об одном способе коррекции аддитивной температурной погрешности в мостовых тензорезисторных схемах / *М. М. Рыбаков, А. Я. Юровский* // *Датчики и системы*. – 1999. – № 7–8. – С. 33–37.

36 *Сгибов А. М.* Температурная компенсация моста, содержащего четыре тензорезистора / *А. М. Сгибов, Б. С. Трухачев, А. В. Носовский* // Приборы и системы управления. – 1975. – № 11.

37 *Спиридонов Н. С.* Дрейфовые транзисторы/ *Н. С. Спиридонов, В. И. Ветроградов* – М. : Сов. радио, 1964. – 304 с.

38 *Спирин В. Г.* Влияние ошибок совмещения на погрешность сопротивления тонкопленочного резистора/ *В. Г. Спирин* // Электронная промышленность. – 2005. – № 1. – С. 60–62.

39 *Спирин В. Г.* Выбор конструкций тонкопленочных резисторов для микросборок высокой интеграции/ *В. Г. Спирин* // Электронная промышленность. – 2005. – № 1. – С. 55–59.

40 *Стучебников В. М.* О нормировании температурной погрешности тензорезистивных полупроводниковых датчиков/ *В. М. Стучебников* // Датчики и системы. – 2004. – № 9. – С. 15–19.

41 *Стучебников В. М.* Физико-технологические методы оптимизации метрологических характеристик полупроводниковых тензопреобразователей/ *В. М. Стучебников* // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 5. – Пенза. – 1985. – С. 15–25.

42 *Стучебников В. М.* Тензорезисторные чувствительные элементы на основе структур «кремний на сапфире» в преобразователях давления для высоких температур / *В. М. Стучебников, В. И. Суханов, В. В. Хасиков* // Приборы и системы управления. – 1981. – № 3. – С. 23.

43 *Сысоева С.* Взгляд на современный рынок автомобильных датчиков. Основные тенденции и важнейшие рыночные фигуры / *С. Сысоева*// Компоненты и технологии. – 2006. – № 7. – С. 18–24.

44 Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. / *М. А. Королев, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева*; под общей ред. *Ю. А. Чаплыгина*. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – Ч. 1: Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. – 397 с.: ил. – 2007.

45 *Тимошенко С. П.* Пластины и оболочки/ *С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер*. – М. : Наука, 1966. – 635 с.

46 Тимошенков С. П., Калугин В. В., Прокопьев Е. П. Исследование технологии очистки поверхности пластин кремния в процессе изготовления структур КНИ и микроэлектронных изделий // Микросистемная техника. – 2003. – №1

47 Фрайден Дж. Современные датчики : Справочник/ Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.

48 Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Третий этап – передача рисунка на материал интегральной микросхемы // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №5. – С. 72-77.

49 Энциклопедия машиностроения. Том III-8. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Под ред. Ю. В. Панфилова. –М.: Машиностроение. – 2000.

50 Эрлер В. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами/ В. Эрлер, Л. Вальтер. – М.: Мир, 1974. –286 с.

51 Hall P. M. Resistance Calculations for Thin Film Patterns, Thin Solid Films, 1, 277–295 (1968).

52 Advanced micro & nanosystems. Vol. 2 CMOS-MEMS. Edited by H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata / WILLEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2005.

53 Alavi M., Büttgenbach S., Schumacher A., and Wagner H.-J. Sensors and Act. A32, 299 (1992).

54 ASTM Standard F 723–88, Standard Practice for conversion between resistivity and dopand density for Boron – and Phosphorus doped silicon. – 1966. Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. Tech. Mat., West Conshohockeen, PA, 1966.

55 ASTM Standard F 84–93, Standard Method for Measuring Resistivity of Silicon Slices With a collinear Four-Point Probe – Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. Tech. Mat., PA, 1966.

56 Capteurs de pressions piezoresistants: Препринт фирмы Schlumberger (Франция), 1976. – 24 p.

57 Couteau T. Dilute RCA cleaning chemistries // Semiconductor International. 1996. Vol. 21. N 11. Oct. P. 95-100.

58 *Elwenspoek M.* Silicon Micromachining. p.cm. – (Cambridge studies in semiconductor physics and microelectronic engineering; 7) // *M. Elwenspoek, H. Jansen* – Cambridge University Press. – 1998 (ISBN 0 521 59054 X).

59 *Gupta M. L.* Analitic evaluation of diffused impurity layers in silicon / *M. L. Gupta, A. B. Shettacharyya* // *Electronic Lett.* – 1970. – Vol. 6. – № 9. – P. 291–293.

60 *Hall R. M., Rosato J. J.* Improving rinse efficiency with automated cleaning tools // *Semiconductor International.* 1996. V. 19. № 11.

61 *Kanda Y. A.* Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon / *Y. Kanda.* – *IEEE Trans. Electron Devices.* – 1982. Vol. ED-29. – P. 64–70.

62 *Mason W. P.* Piezoelektric Crystals and their Application to Ultrasonics, 2nd ed. / *W. P. Mason.* – New York, van Nostrand, 1956.

63 *Meuris M., Merteus P. W., Opdebeeck A.* The IMEC clean: a new concept for particle and metal removal on Si surfaces // *Solid State Technology.* 1995. Vol. 38. N 7. P. 109.

64 *Nittner A.* Abschlußbericht № 8/64 zur FuE-Arbeit “Halbleiterdehnmeßstreifen” / *A. Nittner.* – VEB Meßelektronik Dresden, BT 3, № 4–53/3.

65 *Ohmi T.* Total room temperature wet cleaning of silicon surfaces // *Semiconductor International.* 1996. Vol. 19. N 8. Jul.

66 *Peeters E.* Process Development for 3D Silicon Microstructures, with Application to Mechanical Sensor Design / *E. Peeters.* – Ph.D. thesis, Catholic University of Louvain, Belgium, 1994.

67 *Rohrbach Chr.* Über Funktion, Eigenschaften und Anwendungen von Halbleitergebern / *Chr. Rohrbach, N. Czaika* // *Materialprüfung,* 4, H. 6, 189 (1962).

68 *Smith, C. S.* Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon / *Smith, C. S.* – *Phys. Rev.,* № 1, 42 (1954).

69 *Smith C.S.* Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, *Phys. Rev.* – 94, 42–49, 1954.

70 *Tufte O. N.* Silicon diffused element piezoresistive diaphragms / *O. N. Tufte, P.W. Chapman, D. Long* – *J. of Appl. Phys.* – 1962. – Vol. 33. – № 11. – P. 3322–3327.

71 Tufte O. N. Piezoresistive properties of silicon diffused layers / O. N. Tufte, E. L. Stelzer – J. of Appl. Phys. – 1963. – Vol. 34. – № 9. – P. 313–318.

72 Режим доступа: www.pressure.ru

73 www.frast.ru.

74 <http://elanina.narod.ru/lanina/index.files/student/tehnology/text/page11.htm#p4>.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1.	Общие вопросы измерения давления. Давление как физическая величина	5
2.	Принципы построения олупроводниковых Пьезочувствительных элементов датчиков давлений	12
2.1.	Общие сведения о кремнии. Индексы Миллера	14
2.2.	Пьезоэффект и его математическое описание	23
2.2.1.	Пьезорезистивные коэффициенты	33
2.2.2.	Температурные и концентрационные зависимости сопротивления пьезорезистивных слоев	36
2.3.	Мост Уитстона	39
2.4.	Топология полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений	45
2.4.1.	Пьезорезисторы р-типа проводимости на плоскости (100)	52
2.4.2.	Пьезорезисторы n-типа проводимости на плоскости (100)	54
2.4.3.	Выбор и расчет конструкций полупроводниковых пьезорезисторов	56
2.5.	Температурная зависимость характеристик	68
2.5.1.	Температурная компенсация при питании током ..	77
2.5.2.	Температурная компенсация при питании напряжением	84
2.6.	Вывод функции преобразования полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений	93
3.	Технология изготовления полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений	98
3.1.	Обобщенная технологическая последовательность изготовления полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков давлений	98
3.2.	Химическая обработка пластин	102
3.3.	Окисление	109
3.3.1.	Окисление кремния в атмосфере сухого или влажного кислорода	122

3.3.2.	Окисление кремния в парах воды	124
3.4.	Фотолинтография	127
3.5.	Диффузия	155
3.5.1.	Физические процессы, происходящие при диффузии в полупроводниках	155
3.5.2.	Методы расчетов диффузионных структур	160
3.5.3.	Методы проведения диффузии	163
3.6.	Ионное легирование	170
3.6.1.	Пробег ионов	171
3.6.2.	Дефекты структуры в полупроводниках при ионном легировании	175
3.6.3.	Распределение внедренных ионов	180
3.6.4.	Отжиг легированных структур	186
3.7.	Травление	189
3.7.1.	Вопросы моделирования анизотропного травления кремния в плоскости (100)	189
3.7.2.	Вопросы управления формированием структур методом анизотропного травления	201
3.8.	Метод формирования полупроводниковых пьезочувствительных элементов датчиков абсолютного давления	213
	Заключение	217
	Библиографический список	219
	Содержание	226

Учебное издание

Петр Григорьевич Михайлов
Абдуразак Оразгелдиевич Касимов
Салтанат Алимбековна Усембаева

СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебное пособие

Нач. РО УИЦ
Редактор
Компьютерная верстка

*З. А. Губайдулина
Г. М. Дюсенбаева
А. С. Сайбулатова*

Подписано в печать 20.08.2016 г.

Тираж 300 экз. Формат 60х84х 1/16. Бумага типогр. № 1.
Уч.-изд.л. 14,3. Усл. п.л. 13,4. Заказ №. 755. Цена договорная.

Издание Казахского национального исследовательского
технического университета имени К.И. Сатпаева
Департамент по связям с общественностью КазНITU
г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

ISBN 978-601-228-983-1

