

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

# **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Методические указания к лабораторным работам по одно-  
именному курсу для студентов  
специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неоргани-  
ческих веществ, материалов и изделий» специализации  
1-48 01 01 13 «Химическая технология материалов квантовой  
и твердотельной электроники»

Минск 2006

УДК 541.1:621.382

ББК 24.5:32.852

Т 38

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

Составитель

к.х.н., доцент кафедры Х.ТЭХПиМЭТ

Н.В.Богомазова

Рецензент

к. физ.-мат. наук, ст. преподаватель кафедры физики БГТУ

*А.В.Мисевич*

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2006 г. Поз. 80.

Для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 01 13 «Химическая технология материалов квантовой и твердотельной электроники».

© Учреждение образования  
«Белорусский государственный  
технологический университет», 2006

## **ВВЕДЕНИЕ**

Данное методическое издание предназначено для проведения лабораторных занятий по курсу «Технология полупроводников». Теоретический курс по данной дисциплине включает сведения по методам получения полупроводниковых материалов и физико-химическим основам технологии полупроводниковых изделий. Приведенные ниже лабораторные работы в основной части посвящены технологии изделий на основе полупроводников, а не процессам их получения, поскольку в отечественном народнохозяйственном комплексе реализованы именно производства готовых электронных изделий. Выполнение работ предполагает изучение основных операций планарной интегральной технологии на кремниевых пластинах. Среди них процессы эпитаксиального наращивания пленок, окисления кремния, травления материалов, используемых в структурах микроэлектронных устройств, фотолитографии, входного и текущего контроля. Кроме выполнения экспериментальных работ, практикум предполагает изучение технологических маршрутов формирования базовых полупроводниковых структур (на примере ТТЛШ и КМОП-элементов) с помощью компьютерной программы, что позволяет подробно и наглядно воспроизвести и изучить многооперационные технологические циклы изготовления полупроводниковых интегральных схем и дискретных приборов.

Описание лабораторных работ включает теоретические сведениями, которые наряду с конспектом лекционного курса и литературными источниками, указанными в конце каждой работы, отражают основные закономерности изучаемых процессов. Работы содержат подробное изложение порядка выполнения предложенных заданий, формы отчетных данных и контрольные вопросы для подготовки.

### Лабораторная работа №1

#### **Изучение операций контроля полупроводниковых пластин и структур в технологиях микроэлектроники**

Цель работы: ознакомление с металлографическим методом исследования кристаллической структуры монокристаллического кремния, а также с методом определения толщины p-n-перехода методом сферического шлифа.

#### *Теоретические сведения*

Свойства полупроводниковых приборов существенным образом

зависят как от чистоты используемых материалов, так и от их кристаллической структуры и ее дефектности. Поэтому важным является не только совершенствование технологии получения полупроводниковых кристаллов, но и совершенствование методов их исследования. Для изучения строения твердых тел в настоящее время широко используются электронная микроскопия, электронография, рентгеноструктурный анализ. Однако не потерял своей практической важности и метод оптического исследования поверхности монокристаллического образца, подвергнутого селективному химическому травлению. Этот метод называют по-разному: метод фигур травления, метод световых (или оптических) фигур, металлографический метод. Он прост в выполнении, не требует длительной обработки полученных результатов и дорогостоящего оборудования. Он позволяет определить фазовый состав слитка и степень его однородности. В некоторых случаях с помощью металлографического метода можно довольно точно установить ориентировку отдельных кристаллов, а также определить кристаллическую структуру слитка и ее дефектность.

#### *Определение кристаллического строения слитков*

После кристаллизации в одном слитке может оказаться один, несколько или даже множество кристаллов, ориентированных беспорядочным образом относительно друг друга. Для определения строения слитка часть его или весь слиток подвергают травлению. Для каждого вещества состав травителя различен и подбирается экспериментально. Подбор наиболее эффективного травителя представляет значительную трудность. Обычно процесс травления кристалла состоит в растворении его в ненасыщенном растворе травителя. В отдельных случаях растворяется не само вещество кристалла, а его оксиды, которые образуются при воздействии на кристалл некоторых составных частей травителя. Например, при травлении германия в травителе, состоящем из смеси азотной и плавиковой кислот ( $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ ), азотная кислота окисляет германий до  $\text{GeO}_2$ , который легко растворяется в плавиковой кислоте.

Если слиток полупроводника представляет собой монокристалл, то после травления вся его поверхность будет выглядеть совершенно однородной, без какого-либо видимого различия участков. Аналогичный вид может иметь и поверхность слитка, состоящего из множества мелких кристалликов или зерен. Различие между строением этих двух слитков обнаруживается лишь при микроскопическом исследовании. Как правило, при этом исследуется не весь слиток, а

только его часть, поверхность которой обрабатывается перед травлением специальным образом.

В большинстве случаев обязательным этапом при подготовке поверхности образца к травлению и исследованию ее под микроскопом является полировка, которая производится или химическим способом или на специальном полировальном круге. Обработанная поверхность образца называется шлифом. На поверхности шлифа поликристаллического объекта после травления будут четко обнаруживаться границы зерен, которые травятся значительно быстрее, чем сами зерна. Под микроскопом границы зерен будут выглядеть в виде темной сетки или линий (при большом увеличении). Отдельные зерна при этом могут иметь различные световые оттенки. Такая картина наблюдается в результате того, что при неодинаковой ориентации зерна выходят на поверхность шлифа различными кристаллографическими плоскостями, характер и скорость травления которых различны. Еще более четко будут различаться зерна различного фазового состава.

Для выявления строения слитка, полученного при искусственном выращивании монокристаллов, например, методом Чохральского, нет необходимости исследовать его под микроскопом. Такой слиток обычно бывает либо монокристаллом, либо состоит из двух или нескольких крупных кристаллов. После травления всего слитка его кристаллы легко различаются невооруженным глазом по световым оттенкам.

#### *Определение ориентировки кристаллов по фигурам травления*

Как известно, германий и кремний относятся к кубической системе кристаллов, имеющих структуру типа алмаза. Эту структуру можно представить как две гранецентрированные решетки, смещенные относительно друг друга на  $1/4$  межатомного расстояния по телесной диагонали (рис. 1). Каждый атом в ней, имеет четыре ближайших соседа.

Если через любые атомы кристаллической решетки провести плоскость, то в идеальном кристалле расположение атомов в каждой из таких плоскостей всегда будет строго периодическим, а плотность их на единицу площади строго определенной. В отдельных местах реальных кристаллов указанные закономерности не соблюдаются. Однако, как пра-

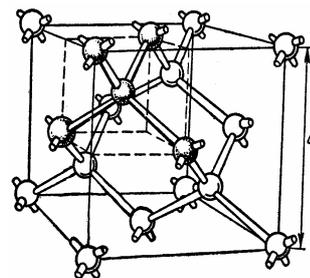


Рис. 1. Кристаллическая структура алмаза

вило, число этих нарушений невелико, так что они не искажают общей картины кристалла.

На рис. 2 показаны три наиболее важные кристаллографические плоскости и направления для кубической решетки. Положение плоскостей даны в индексах Миллера, которые обратно пропорциональны отрезкам, отсекаемым плоскостью на координатных осях. У кристаллов со структурой алмаза плоскость (111) обладает наибольшей плотностью атомов на единицу ее площади и называется плоскостью плотнейшей упаковки атомов. На плоскостях (010) и (110) плотность атомов несколько меньше. Для германия и кремния кристаллографические направления, соответствующие указанным плоскостям, являются предпочтительными при росте монокристаллов в процессе их вытягивания из расплава или при получении их каким-либо другим способом.

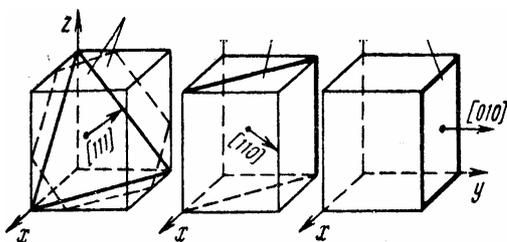


Рис. 2. Наиболее важные кристаллографические плоскости и направления для кубической решетки

Периодичность и строго определенный порядок в расположении атомов кристалла существенным образом сказываются и на его свойствах. В отличие от аморфных и поликристаллических тел, почти все свойства монокристаллических веществ по разным направлениям различны, то есть анизотропны. В частности, при химическом взаимодействии кристаллов с травителями растворение их граней по разным кристаллографическим направлениям, как правило, происходит с различной скоростью.

При погружении кристалла в растворяющую жидкость разрушение его поверхности начинается одновременно во всех точках. Если травитель действует сильно и кристалл растворяется быстро, то невозможно проследить за процессом растворения, так как грани кристалла как бы смываются конвекционными потоками жидкости. В том случае, когда травление производится в слабом травителе и продолжительное время, на гранях кристалла образуются правильные фигуры различной внешней формы, которые получили название фигур травления. Они легко наблюдаются под микроскопом. Установлено, что фигуры травления на различных кристаллографических плоскостях различны. Однако это еще не означает, что они имеют не одинаковую объемную форму. Многообразие фигур травления на тех или

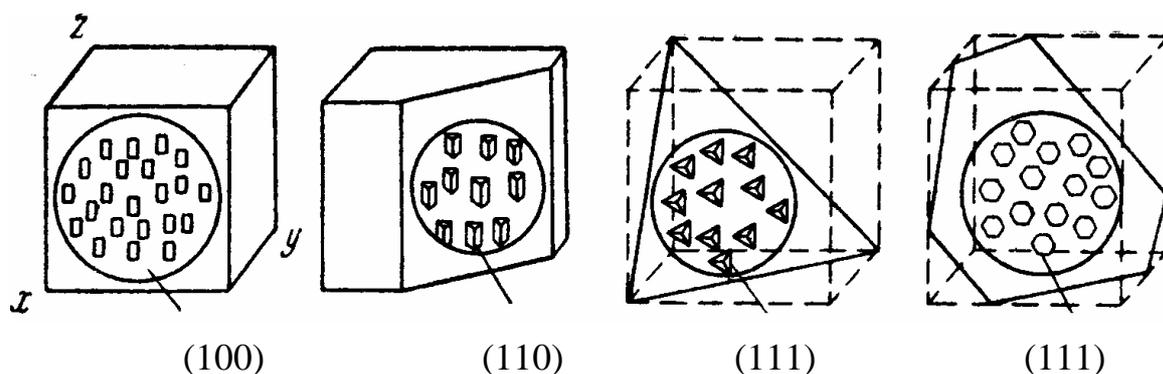


Рис. 3. Фигуры травления для плоскостей (111), (100) и (110)

иных кристаллографических плоскостях вызвано тем, что одна и та же объемная форма фигур травления в разных проекциях на разных макроскопических гранях кристалла, где их наблюдают, выглядит неодинаково. Например, тетраэдр может проектироваться как в виде треугольника, так и в виде четырехугольника. В кристаллах с кубической элементарной ячейкой, к которым относятся германий и кремний, для основных кристаллографических плоскостей (111), (100) и (110) фигуры травления имеют вид, изображенный на рис. 3. Из рисунка следует, что фигуры травления по форме в какой-то степени соответствуют сечениям, образованным соответствующими кристаллографическими плоскостями с элементарной ячейкой.

Для выявления фигур травления на *германии* применяется так называемый пергидролевым травитель, в состав которого входят пергидроль (перекись водорода), плавиковая кислота и вода (10 мл 30%-го  $H_2O_2$ , 10 мл 48%-ной  $HF$ , 40 мл  $H_2O$ ). Образец травится при комнатной температуре или при незначительном подогреве в течение 3–5 мин.

Некоторые травители дают картину фигур травления только на определенной кристаллографической плоскости и позволяют установить ориентировку, соответствующую только этой плоскости. Такие травители получили название селективных. Для германия селективным травителем является серебряный травитель, в состав которого входят плавиковая и азотная кислота, вода и азотнокислое серебро (40 мл  $HF$ , 20 мл  $HNO_3$ , 40 мл  $H_2O$  и 2 г  $AgNO_3$ ). Травление производится в кипящем растворе в течение 5 мин. Этот травитель выявляет в германии плоскость (111) и дает при травлении фигуры резко очерченных треугольников. Поверхность образца германия, предназначенного для исследования, перед травлением подвергается шлифовке, а затем химической или механической полировке. Раствор для химиче-

ской полировки германия содержит плавиковую, азотную кислоты и дистиллированную воду, которые смешиваются в пропорции 4:4:1. Перед полировкой раствор подогревается. Образцы выдерживаются в растворе 15–20 сек после начала выделения бурого оксида азота. В состав травителя для *кремния* входят 50% щелочи и 50% дистиллированной воды. Травление производится в кипящем растворе в течение 10–15 мин. Быстрое селективное травление кремния для всех плоскостей можно осуществить в травителе Дэша ( $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 3 : 1 : 8-12$ ) при комнатной температуре.

По геометрии фигур травления можно судить об ориентации кристалла, о присутствии тех или иных элементов симметрии, а также о его монокристалличности. В том случае, если образец не представляет собой монокристалла, в различных местах одной и той же его грани фигуры травления будут различными. Точность определения ориентации кристалла методом фигур травления составляет 2—3°. Более точное и надежное определение ориентации монокристалла осуществляется рентгенографическим методом. Однако этот метод более сложен и длителен во времени. На практике выбор того или иного метода определения ориентации кристалла зависит от конкретных задач, стоящих перед исследователем. При изготовлении полупроводниковых приборов, на характеристики которых оказывает влияние кристаллографическое направление исходной монокристаллической заготовки, метод фигур травления получил широкое применение.

#### *Выявление структурных дефектов в кристалле*

Структурными дефектами называют нарушения правильности расположения атомов кристаллической решетки: замена атомов основного вещества чужеродными атомами, отсутствие атомов в узлах решетки (так называемые вакансии), наличие атомов основного вещества или чужеродных атомов не в узлах решетки, а в ее междоузлиях. Кроме того, существует распространенный вид пространственных (протяженных) дефектов, получивший название дислокаций. В отличие от других типов структурных дефектов дислокации оказывают воздействие на кристаллическую решетку на расстояниях больших, чем несколько межатомных промежутков. Дислокации образуются в процессе роста кристалла при пластической деформации, при наличии больших температурных градиентов и т. д. Незаполненные связи на линиях дислокаций создают глубокие локальные уровни в запрещенной зоне полупроводника. От плотности дислокаций в зна-

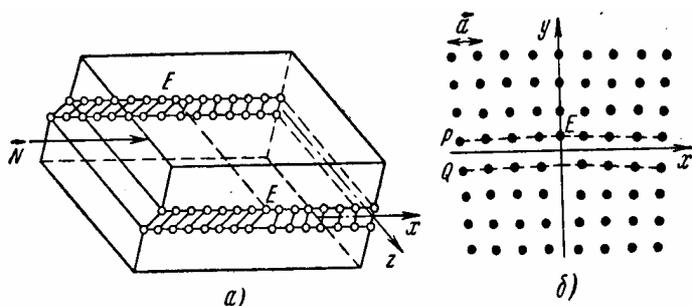


Рис. 4. Образование линейной дислокации

чительной степени зависят электрические, фотоэлектрические и механические свойства кристалла. Наличие дислокаций в полупроводнике существенно сказывается на качестве изготовленных из него приборов. Различают два основных типа дислокаций: краевую и винтовую. Однако существуют и промежуточные случаи, которые можно считать комбинацией двух основных типов.

Рассмотрим *краевую* или, как ее еще называют, *линейную дислокацию* на примере кристалла простой кубической структуры. Пусть верхняя часть кристалла сдвинута относительно нижней так, как это представлено на рис. 4. Плоскость  $xz$  является плоскостью скольжения. Линия, перпендикулярная направлению сдвига, представляет собой границу между двумя областями: деформированной (левой) и недеформированной (правой). В результате сдвига на один период решетки атомная плоскость верхней части кристалла не находит себе продолжения в нижней. Линия  $EE$ , являющаяся краем этой прерванной атомной плоскости внутри кристалла, получила название краевой, или линейной дислокации. Итак, краевую дислокацию можно представить как результат появления в кристалле дополнительной атомной полуплоскости. При этом линия дислокации является краем этой полуплоскости. Особенностью структуры кристалла в районе дислокации является сближение атомов в недеформированной части кристалла в направлении скольжения  $N$  (верхний ряд атомов на рис. 4) и удаление – в деформированной части (нижний ряд атомов на рис.4).

*Винтовые дислокации* или, дислокации Бургерса, появляются в том случае, когда скольжение происходит в основном параллельно линии дислокации, а не перпендикулярно к ней, как это наблюдается в случае краевой дислокации (рис. 5). Пусть правая верхняя его часть сдвинута в направлении  $N$  относительно нижней на один межатомный промежуток так, что на поверхности кристалла образуется ступенька  $аба'з'u'из$  (рис. 5,а). Линией дислокации или осью винтовой дислокации здесь является линия  $EE$  (рис. 5, в). Она проходит внутри дефектной конфигурации атомов и называется винтовой потому, что атомы  $абвга'...$  лежат на винтовой линии, проходящей через весь кристалл

(рис. 5,б). Если идеальный кубический кристалл можно представить как систему из параллельных атомных слоев, наложенных друг на друга, то из атомной модели реального кристалла, имеющего одну винтовую дислокацию, следует, что при наличии винтовой дислокации кристалл состоит из одной атомной плоскости, закрученной в форме винтовой лестницы (рис. 5,б). Наличие винтовых дислокаций в кристалле облегчает достройку его решетки в процессе роста.

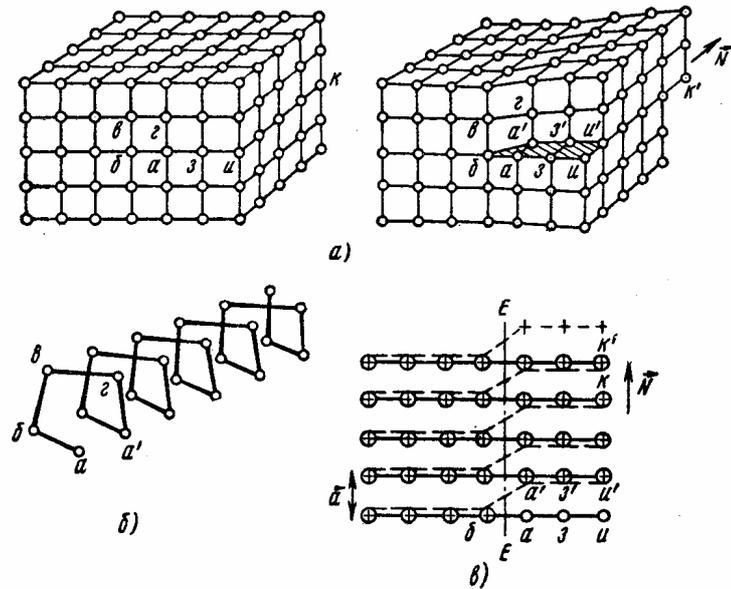


Рис. 5. Винтовая дислокация: а) образование; б) структура вдоль оси дислокации; в) структура в плоскости сдвига: О—атомы нижележащей; + — атомы вышележащей атомных плоскостей; - - - атомный ряд, изогнутый при образовании дислокации

На практике для выявления дислокаций в кристаллах пользуются рентгенографическим, металлографическим методом и методом декорирования. Наиболее простым из этих методов, хотя и несколько менее точным, является металлографический метод. Сущность его состоит в выявлении дислокаций путем химического воздействия на поверхность кристалла специально подобранным травителем. Дело в том, что скорость травления в местах выхода дислокаций гораздо больше, чем в других точках кристалла; в результате этого в месте выхода дислокации на шлифе после травления образуется ямка. Форма основания ямки травления зависит от ориентации плоскости, где идет травление. Сама ямка всегда представляет собой пирамиду с вершиной, уходящей в глубину шлифа.

В отличие от фигур травления ямки травления не покрывают всю поверхность шлифа, а располагаются только в местах выхода дислокаций (рис.6). Количество ямок травления на шлифе не должно зависеть от времени травления. Но при очень большой продолжительности процесса травления основания ямок настолько расплываются по шлифу, что могут перекрыть одно другое. В этом случае под-

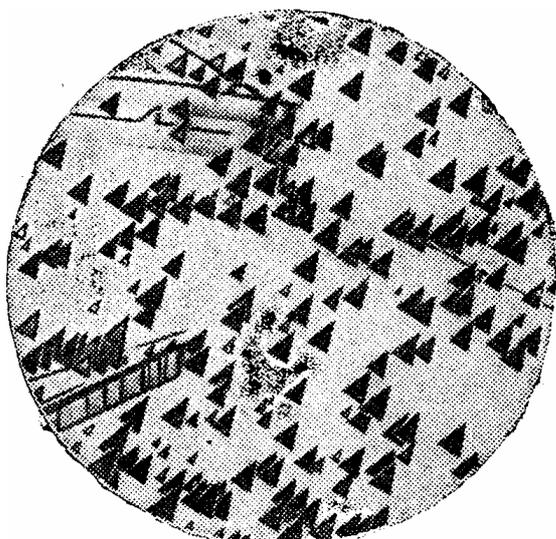


Рис. 6. Выход дислокаций на плоскость (111) образца германия

ции, идущие с большим отклонением от нормали к исследуемому шлифу, практически имеют гораздо меньшее значение, чем те, которые идут параллельно ей. Поэтому металлографический метод выявления дислокаций можно считать достаточно точным. Подсчитав число ямок травления под микроскопом, можно приблизительно определить число дислокаций, приходящихся на один квадратный сантиметр травленной поверхности шлифа. Расчет средней плотности ямок травления  $N_d$  производится по формуле

$$N_d = n/S, \quad (1)$$

где  $n$  – среднее количество дислокационных ямок в поле зрения микроскопа;

$S$  – площадь поля зрения

Характерным дефектом эпитаксиальных структур являются дефекты упаковки (рис. 7), которые представляют собой пространственные непротяженные области, на границе которых происходит рассогласование кристаллической решетки. Причиной таких дефектов выступают нерегулярные (то есть смещенные из узла) атомы на поверхности подложки. Такой атом зарождает дефект, который

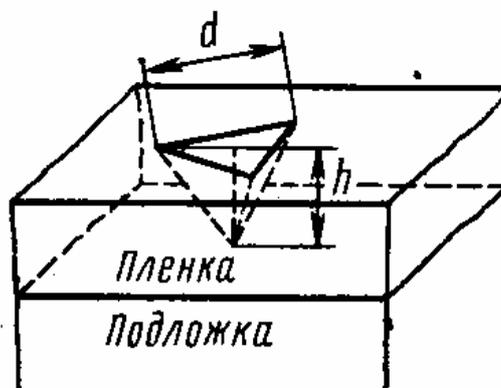


Рис. 7 Дефект упаковки

счет плотности дислокаций значительно затрудняется. Следует сказать, что методом химического травления выявляются не все дислокации, а лишь те, которые идут или перпендикулярно шлифу, или с небольшим отклонением от этого направления. В этом и состоит неточность металлографического метода исследования дислокаций. Плотность дислокаций, рассчитанная по количеству ямок травления, всегда будет несколько заниженной. Однако в ряде случаев дислока-

развивается вдоль непараллельных плоскостей (111) и образует тетраэдр с вершиной на подложке и основанием на поверхности эпитаксиальной пленки. После обработки в селективном травителе такой дефект выявляется в виде равносторонних незатушеванных треугольников, линий и других фигур.

Хорошим травителем для выявления дислокаций и дефектов в *германии* является СР-4, одновременно оказывающий и полирующее действие на кристалл. В состав СР-4 входят азотная, плавиковая и уксусная кислоты, в смесь которых добавляется несколько капель брома (50 мл  $\text{HNO}_3$ , 30 мл  $\text{HF}$ , 30 мл  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 0,6 мл  $\text{Br}_2$ ). Травление производится при комнатной температуре в течение 3—10 мин, в зависимости от исследуемой плоскости и состояния поверхности. Достаточно хорошим и менее опасным в работе является селективный травитель, в состав которого входят едкий калий, красная кровяная соль и вода (12 г  $\text{KOH}$ , 8 г  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  и 100 г  $\text{H}_2\text{O}$ ). Он прекрасно выявляет дислокации на плоскости (111) и хуже на плоскости (110). Травление производят при кипячении в течение 5—6 мин. Химическую полировку образцов в этом случае производят в том же растворе, что и при исследовании фигур травления.

При изучении дефектов в *кремнии* для различных плоскостей используют травитель Секко ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (0,15 М) :  $\text{HF} = 1 : 2$ ), который предполагает обработку в течение 5-20 минут и работает в широком диапазоне сопротивлений. Для плоскости (111) можно использовать другой хромсодержащий травитель состава: 15 г  $\text{CrO}_3$ +35 мл  $\text{H}_2\text{O}$ +15 мл  $\text{HF}$ . Такой травитель хорошо выявляет ямки травления за 10-20 минут.

#### *Контроль линейных размеров полупроводниковых структур*

Полупроводниковые структуры, составляющие основу приборов и интегральных схем имеют линейные размеры микронного и субмикронного уровня, которые контролируются практически на всех этапах производства поскольку глубина каждого слоя или области структуры жестко лимитируется. Контроль глубины или толщины проводится на операциях эпитаксии, окисления, фотолитографии, локального легирования, металлизации и других. В этих целях используется ряд методов таких, как оптическая и электронная микроскопия, многообразные спектральные методы, метод ямок травления, методы косоугольного или сферического шлифа.

Метод ямок травления уже рассмотрен нами для определения

плотности дислокаций в монокристаллическом объекте при изучении его дефектности. Такой метод позволяет также определять толщину эпитаксиального слоя на поверхности кремния заданной кристаллографической ориентации. В этом варианте метод называют методом Дэша. Он основан на измерении характерных геометрических размеров дефектов упаковки эпитаксиального слоя (рис. 7). В частности с помощью микроскопа измеряется сторона равностороннего треугольника  $d$  (рис. 7), являющегося основанием тетраэдрического дефекта упаковки. Толщина пленки  $h$  (высота тетраэдра, вершина которого находится на подложке) при этом рассчитывается из соотношения:

$$h = d (2/3)^{1/2} = 0,816 d \quad (2)$$

При измерениях по методу Дэша следует учитывать самые большие фигуры (дефекты) роста, которые проросли через всю пленку. Достоинством метода является возможность его использования для любых сочетаний контактирующих слоев ( $n$ - $p$ ,  $n$ - $n^+$ ,  $p$ - $p^+$ ).

Метод косоугольного или сферического шлифа позволяет контролировать толщину слоев, для которых тип проводимости не совпадает с типом проводимости подложки. То есть с помощью этого метода можно контролировать структуры на основе  $p$ - $n$ -переходов (например, толщину пленок  $n$ -типа на подложках  $p$ -типа, глубину залегания

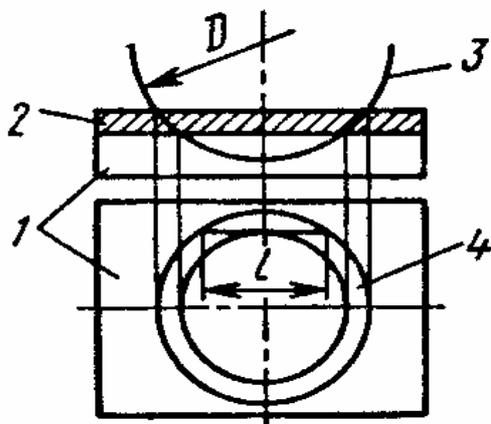


Рис. 8. Схема изготовления и замеров в методе сферического шлифа: 1 – подложка; 2 – поверхностный слой; 3 – стальной шар; 4 – окрашенная область

сформированных при легировании  $p$ - $n$ -переходов). Для измерения глубин залегания микронного и субмикронного уровня удобно изготавливать сферический шлиф (рис. 8) и использовать его для частичного окрашивания в селективном травителе. Это окрашивание проявляется потемнением  $p$ -области (в результате более интенсивного окисления в присутствии акцепторных примесей) при обработке раствором HF с небольшим (около 0,1 %) содержанием HNO<sub>3</sub>. Для  $n$ -области используют декорирование (в результате осаждения меди) в растворе HF+CuSO<sub>4</sub>. Сферический шлиф изготавливают при вращении стального шара диаметром 30-100 мм, прижимаемого к поверхности, при подаче абразивной

суспензии в зоне контакта шара с поверхностью подложки. Диаметр зерна абразива не должен превышать 1 мкм, а глубина сферической лунки должна быть больше глубины залегания *p-n*-перехода. Глубина залегания *p-n*-перехода (или толщина эпитаксиального слоя) определяется после замеров длины хорды сферического шлифа *l* и диаметра лунки *D* соотношением:

$$h = \frac{l^2}{4D}. \quad (3)$$

Точность метода зависит от качества изготовления шлифа и точности измерений характерных размеров. Она составляет около 5-10 %. Для увеличения достоверности измерений на практике проводят ряд опытов в различных областях исследуемой поверхности (в центре и в четырех точках по краям) и усредняют полученные значения.

### **Выполнение работы**

*Оборудование:* фторопластовая и стеклянная посуда для химической обработки и промывки образцов; пинцет; термометр; электрическая плитка; сушильный шкаф; металлографический микроскоп МЕТАМ-1 в комплекте с микрометром.

*Материалы:* образцы монокристаллического кремния различной кристаллографической ориентации (без и с подготовкой к структурным исследованиям в производственных условиях); образцы эпитаксиальных структур кремния (*p-n*-типа); дисциллированная вода; толуол (этанол);  $\text{HNO}_3$ ;  $\text{HF}$ ;  $\text{CrO}_3$ ; фильтровальная бумага.

**Часть 1.** *Исследование структуры и дефектности монокристаллического кремния.*

1. Приготовить растворы для химической полировки и селективного травления кремния составов:

а)  $\text{HNO}_3 : \text{HF} = 2 : 1$  (полирующий травитель Уайта);

б) 15 г  $\text{CrO}_3$  + 35 мл  $\text{H}_2\text{O}$  + 15 мл  $\text{HF}$  (селективный травитель для Si (111)).

2. Провести подготовку поверхности (удаление механических загрязнений промывкой, обезжиривание в органических растворителях (четыреххлористый углерод, толуол, этанол) или протиранием ватным тампоном) и химическую полировку образцов кремния с целью получения зеркальной поверхности в течение 30 – 50 сек при комнатной температуре. Затем промывка в проточной воде и сушка.

3. Провести исследование подготовленных объектов с целью

выявления:

а) монокристалличности образца (в случае немонотонности наблюдается либо выраженная межкристаллитная граница, либо фигуры травления различной формы на одной грани кристалла);

б) кристаллографической ориентации плоскости роста (по форме фигур травления (рис. 3);

в) наличия дислокаций (в виде черных треугольников для Si (111)) и определения их плотности по соотношению (1).

4. Провести сравнительное исследование образцов, подготовленных в производственных условиях согласно пункту 3 и сделать вывод о качестве проведенной подготовки образцов к структурным исследованиям.

5. Полученные результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	Вид подготовки	Монокристалличность	Ориентация	Плотность дислокаций, см <sup>-2</sup>
1.				

**Часть 2. Определение толщины эпитаксиальной пленки.**

1. Провести исследование под микроскопом подготовленных в производственных условиях образцов эпитаксиальных структур с целью выявления дефектов упаковки (незатушеванные) равносторонние треугольники для Si (111).

2. Провести замеры стороны дефектов упаковки (в 5 точках для наиболее крупных фигур) с помощью окуляра с координатной сеткой. Определить реальные размеры дефектов с помощью микрометра.

3. Провести расчеты толщины эпитаксиального слоя по методу Дэша в соответствии с соотношением (2).

4. Провести исследования образцов по методу сферического шлифа. При наблюдении в микроскоп определить диаметр лунки и длину хорды для расчета толщины соответствующего слоя по выражению (3). Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	Данные метрических замеров			Толщина слоя, мкм
	обозначение (метод)	величина		
		деления (объектив)	мкм	

## **Контрольные вопросы**

1. Особенности монокристаллического состояния твердых тел.
2. Точечные дефекты и дислокации в монокристаллах.
3. Дефекты упаковки в эпитаксиальных структурах.
4. Селективные и полирующие травители для простых полупроводников.
5. Метод фигур травления.
6. Метод Дэша.
7. Метод сферического шлифа.

## **Литература**

1. Сангвал К. Травление кристаллов. – М.: Мир, 1990. – с. 15–23, 33, 396–404.
2. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – с. 177–179, 211–212.
3. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., Кн.1. – 1986. – с.46–47, 114–116.

### **Лабораторная работа № 2**

#### **Изучение операций контроля и видов брака процесса формирования эпитаксиальных пленок кремния**

Цель работы: ознакомление с процессами получения эпитаксиальных пленок кремния, получение навыков определения основных видов и причин брака, а также контроля операции эпитаксии кремния.

#### **Теоретические сведения**

Эпитаксией (от греческого «эпи» – «на», «таксис» – «упорядочение») называется рост монокристалла одного состава на монокристалле отличного состава. В микроэлектронике часто эпитаксией называют ориентированный рост монокристаллической пленки на поверхности монокристалла, т.е. просто достраивание монокристаллической подложки. При этом составы подложки и пленки обычно отличаются (например, природой и количеством примесей), что делает правомочным использование термина «эпитаксия» для таких технологий.

В настоящее время технология создания эпитаксиальных структур активно развивается как в виде гомо- или автоэпитаксии (кремний на кремнии в производстве полупроводниковых интегральных схем), так и в виде гетероэпитаксии (кремний на диэлектрике (например, сапфире) в технологии полупроводниковых приборов и гибридных схем, а также микро- и наногетероструктуры в квантовой и оптической электронике (например, многослойные системы на основе со-

единений и твердых растворов класса  $A^{III}B^V$ ). Для получения эпитаксиальных структур используются газофазные методы (гидридно-хлоридная эпитаксия кремния), МОС (металлорганические соединения)-гидридная эпитаксия соединений  $A^{III}B^V$ , жидкофазные методы при кристаллизации пленок из насыщенных растворов-расплавов, а также вакуумные методы, использующие конденсацию атомно-молекулярных пучков в вакууме (молекулярно-лучевая эпитаксия).

В технологиях получения полупроводниковых приборов и интегральных схем формирование биполярных структур в эпитаксиальных слоях (а не в объеме подложки), позволило разрешить проблему создания некомпенсированных функциональных слоев (с заданным типом и уровнем проводимости) на определенной подложке при одновременной изоляции функциональной структуры p-n-переходом. Определенное сочетание удельного сопротивления и типа проводимости кремниевой подложки и эпитаксиальной пленки позволило разрешить проблему сочетания высокого напряжения пробоя коллекторного перехода, хороших частотных свойств и малой рассеиваемой мощности в транзисторе. В результате выход годных приборов и схем увеличился в несколько раз и приблизился к 98%. Эпитаксиальные структуры благодаря их чистоте (отсутствие углерода и кислорода), совершенству, гибко регулируемому составу используются также и при создании интегральных схем на МОП и КМОП-структурах.

Наибольшее промышленное значение имеет процесс эпитаксиального наращивания кремния (чаще легированного в соответствии с заданными требованиями) на кремниевые пластины. При этом толщина пленок составляет  $0,2 \div 10$  мкм (максимально до 100-200, когда возможно прирастание подложки к подложкодержателю), удельное сопротивление –  $0,01 \div 10$  Ом·см, что соответствует концентрации активной примеси  $10^{14} \div 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Марка эпитаксиальной структуры обозначается в виде дроби, например (в технологии интегральных схем) :

$$100 \frac{7KЭФ0,3 / 2,5KЭС30}{200КДБ10(111)},$$

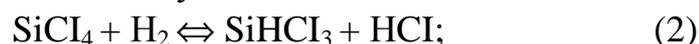
что обозначает *эпитаксиальный кремниевый слой* электронного типа толщиной 7 мкм с удельным объемным сопротивлением 0,3 Ом·см (легирован фосфором) на *кремниевой пластине*, ориентированной по плоскости (111), толщиной 200 мкм диаметром 100 мм с сопротивлением 10 Ом·см, а также *скрытый слой* толщиной 2,5 мкм с поверхностным удельным сопротивлением 30 Ом/ .

В производственной практике самое широкое распространение получили методы эпитаксии кремния из газовой фазы, которые чаще осуществляются в вертикальных реакторах. В качестве источника кремния в таких гидридно-хлоридных методах можно использовать 4 соединения (таблица 1): тетрахлорид кремния, трихлорсилан, дихлорсилан и силан, а в качестве источника примеси – гидриды соответствующих элементов (фосфин, арсин, диборан и др.)

В основе получения кремния лежат реакции восстановления кремнийсодержащих соединений или разложения гидрида. Наиболее распространенным остается процесс восстановления тетрахлорида кремния. В этом случае паро-газовая смесь образуется при пропускании водорода через испаритель с  $\text{SiCl}_4$ , где поддерживается температура, необходимая для обеспечения заданного парциального давления тетрахлорида в смеси. Суммарный процесс восстановления  $\text{SiCl}_4$  отражается уравнением:



В реакторе возможно протекание следующих стадий:



а также побочных процессов:

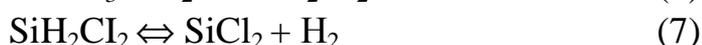
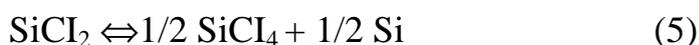


Таблица 1

### Технологические параметры эпитаксиального получения кремния

Источник кремния	Диапазон скорости роста, мкм/мин	Диапазон температуры, °С	Энергия активации, эВ
$\text{SiCl}_4$	0,4–1,5	1150–1250	1,6–1,7
$\text{SiHCl}_3$	0,4–2	1100–1200	0,8–1
$\text{SiH}_2\text{Cl}_2$	0,4–3	1050–1150	0,3–0,6
$\text{SiH}_4$	0,2–0,3	950–1050	

Вероятность такого большого числа взаимодействий в системе  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$  обусловлена тем, что по направлению движения газового потока реагентов концентрация  $\text{SiCl}_4$  уменьшается, а концентрация промежуточных продуктов восстановления  $\text{SiCl}_4$  ( $\text{SiHCl}_3$ ,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ) и  $\text{HCl}$  увеличивается.

При разработке технологии получения пленок заданного состава и степени совершенства структуры с однородным распределением толщины по площади поверхности подложки необходимо осуществить выбор по следующим факторам:

- состав газовой смеси ( источник кремния и примесей);
- температура;
- газодинамические условия роста;
- природа (состав, дефектность) и состояние поверхности подложки;
- скорость осаждения пленки и др.

**В состав газовой смеси** хлоридного метода выращивания кремния входит кремнийсодержащий компонент ( $\text{SiCl}_4$ ), газ-восстановитель ( $\text{H}_2$ ), который одновременно выполняет функцию газ-носителя, и источник активной примеси ( $\text{PCl}_3$ ,  $\text{H}_2\text{B}_6$ ,  $\text{AsH}_3$  и др.)

Характеризуя природу источника кремния, отметим, что хлоридные методы менее критичны к состоянию поверхности и содержанию окислителей в атмосфере реактора в сравнении с силановым методом. При этом использование дихлорсилана позволяет достичь более высоких скоростей роста пленки при пониженной температуре. По этой причине в наиболее современных реакторах индивидуально (поштучного) наращивания эпитаксиального кремния используют именно  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ . В случае наименее активного тетрахлорида кремния понижаются требования к подготовке поверхности подложки, содержанию окислителей в реакторе, а также уменьшается дефектность получаемых пленок. Минимальной скоростью роста характеризуется плоскость (111). Силановый процесс позволяет получать наиболее чистые пленки и наименьшее автолегирование. В этом методе скорость роста пленки не зависит от кристаллографической ориентации пластины, поскольку реакция разложения силана в условиях наращивания является необратимой. Однако, силан склонен к разложению, что приводит к загрязнению пластин и стенок реактора кремниевыми кристаллитами. Кроме того, он самовоспламеняется при содержании в газовой смеси более 2%.

Концентрация кремнийсодержащего компонента в газовой сме-

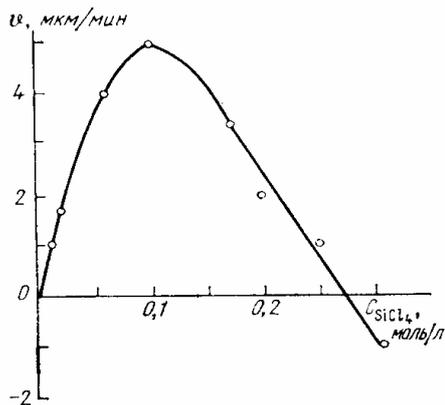


Рис.1. Зависимость скорости роста эпитаксиального кремния от концентрации  $\text{SiCl}_4$  при  $1170^\circ\text{C}$ .

си определяет скорость роста пленки (рис.1). При высоких содержаниях  $\text{SiCl}_4$  на поверхности подложки происходит стравливание кремния согласно реакции (10). Важным параметром является соотношение  $\text{SiCl}_4 : \text{H}_2$ . Максимальный выход кремния (около 100 %) обеспечивается при мольном соотношении водорода и тетрахлорида свыше 200:1. При соотношении ниже 5:1 осаждение почти не происходит в результате конкурирующего протекания реакций (10) и (8).

Легирование эпитаксиальных структур возможно как с использованием жидких при обычных условиях источников (хлориды соответствующих элементов), так и газообразных (гидриды соответствующих элементов).

Хлориды активных элементов имеют давление пара, близкое к давлению пара  $\text{SiCl}_4$ , что упрощает расчеты паро-газовой смеси. Однако, при выборе следует учитывать коэффициент превращения  $K_{\text{п}}$ , равный отношению концентрации компонента в слое и растворе. Поэтому при получении высокоомных слоев (концентрация менее  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) лучше вместо  $\text{PCl}_3$  ( $K_{\text{п}}=1$ ) использовать  $\text{SbCl}_3$  ( $K_{\text{п}}=0,002$ ). Использование гидридов соответствующих элементов для легирования позволяет улучшить однородность пленок, поскольку в этом случае концентрация примеси в пленке почти не зависит от температуры. Ввиду высокой токсичности гидридов используются их смеси с водородом или аргоном (0,001-5 %).



Рис. 2. Температурная зависимость скорости роста эпитаксиального кремния в хлоридном методе.

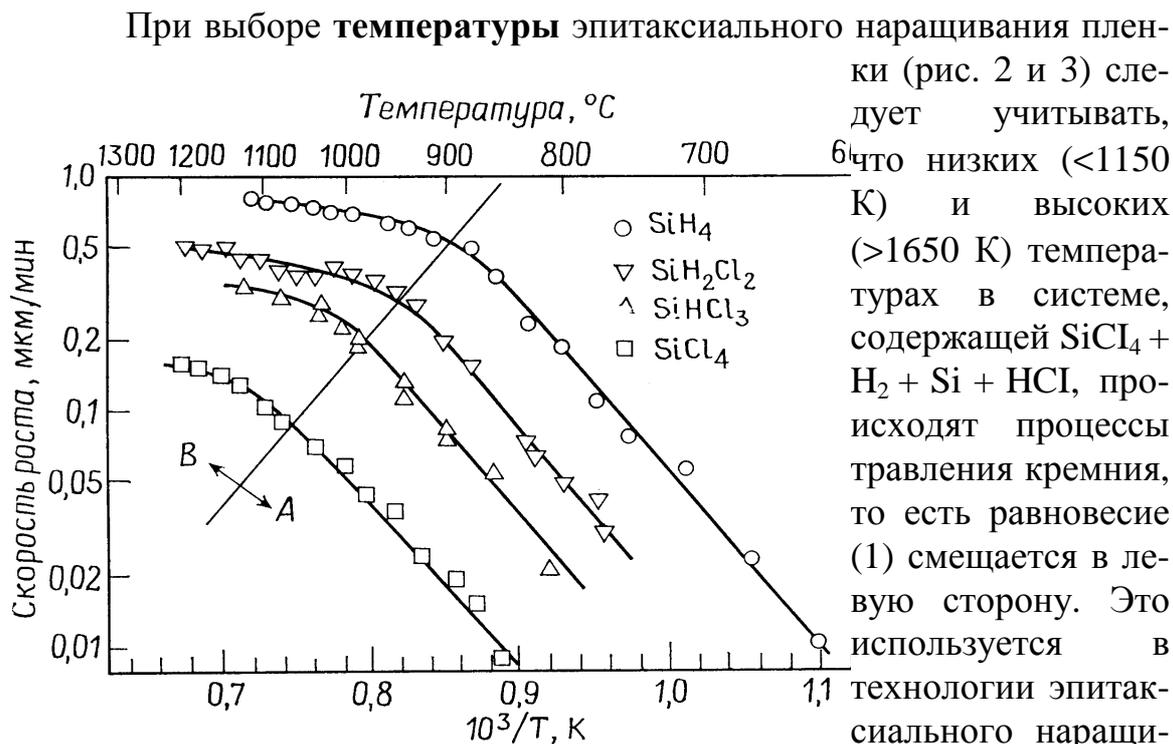


Рис. 3. Температурная зависимость скорости роста эпитаксиального кремния для различных источников кремния.

непосредственно в эпитаксиальном реакторе перед выращиванием монокристаллической пленки. При изменении температуры процесса в пределах рабочего диапазона (1300 – 1500 К) происходит переход из области А (рис. 3) кинетического контроля (лимитирует реакция (3) – диссоциативная адсорбция трихлорсилана) в область диффузионного контроля В. Промышленные процессы при атмосферном давлении обычно проводят в области В для уменьшения влияния температуры на скорость роста пленок (рис. 3). Понижение температуры роста на 20 – 30 К, с одной стороны, приводит в ухудшению качества воспроизведения фотолитографических рисунков скрытых слоев на подложке, а с другой, – уменьшает число линий скольжения в пленке. Кроме температуры в зоне роста, большое значение для качества пленок имеют скорости нагрева и охлаждения пластин. Они составляют 100 – 50 К/мин для нагрева и 100-70 К/мин для охлаждения.

**Газодинамические условия** эпитаксии определяются скоростью движения газовой смеси относительно подложкодержателя с

пластинами, которая при прочих равных условиях (диаметр реактора (около 80-100 см), вязкость и плотность газа) прямо пропорциональна числу Рейнольдса. Ламинарный режим течения газа обеспечивают скорости порядка нескольких десятков см/с.

Перед нанесением эпитаксиальной пленки кремниевые пластины, выступающие **подложками**-затравками в процессе газофазной эпитаксии, подвергаются многоступенчатой очистке с использованием и химических (органические, кислотные, щелочные реагенты, газофазное травление) и физических (гидромеханические, ультразвуковые) способов обработки. Важное значение имеет состав и дефектность кремниевой пластины, поскольку трудно получить эпитаксиальный слой с дефектностью более низкой, чем подложка по причине прорастания дефектов.

**Скорость** эпитаксиального наращивания кремния определяется практически всеми факторами, упомянутыми выше (источник кремния (табл. 1), состав газовой смеси (рис. 1 и 2), температура (рис. 2 и 3), скорость потока и др.). Стремление увеличить производительность процесса за счет скорости на практике необходимо согласовывать с условиями получения качественных монокристаллических слоев.

**Показателями качества** эпитаксиальных пленок являются совершенство структуры (малое число дефектов), отсутствие посторонних примесей, заданный тип и уровень удельного сопротивления, равномерность пленки по составу (сопротивлению) и толщине, минимальное смещение топологического рельефа и автолегирование. Некоторые виды брака, встречающиеся в хлоридной технологии получения эпитаксиальных пленок кремния приведены в таблице 2.

Таблица 2

Некоторые виды и причины брака эпитаксиальных структур

N п/п	Вид брака	Характеристика	Причины
1	2	3	4
1.	Окисление поверхности кремния	Изменение цвета пластины в желто-голубо-фиолетовую гамму	Неудовлетворительная подготовка газовой смеси, загрязнение кислородом
2.	Приплавившиеся частицы	характерные неровности на поверхности	Наличие посторонних частиц в реакторе, и на поверхности пластины

Продолжение таблицы 2			
1	2	3	4
3.	Неоднородность и несоответствие толщины пленки	Отклонения по толщине и концентрации свыше допусков	Нарушение заданного состава газовой смеси и температурного режима
4.	Линии скольжения (КЗЛС (коэффициент заполнения линиями скольжения) в норме <30%)	Проявление линий скольжения (при высоком содержании в виде звезды Давида) после селективного травления	Повышенная скорость нагрева или охлаждения, повышенная температура роста пленки
5.	Дефекты упаковки (плотность дефектов < 100 см <sup>-2</sup> )	Характерные фигуры травления после селективного травления ((111)- треугольники, (100) - прямоугольники)	Механические и химические загрязнения на поверхности подложки и в реакторе, повышенная дефектность кремниевых подложек
6.	Поликремний	Матовая поверхность или пятна с белосерым оттенком	Нарушение температурного режима, загрязнения в реакторе (N <sub>2</sub> ), контакт нерабочей поверхности пластины с подложкодержателем в результате прогиба (отжиг механических напряжений в подложке)
7.	Свирл-дефектность	винтовые матовые области	Повышенная дефектность кремниевых подложек
8.	Дислокации (плотность дислокаций < 100 см <sup>-2</sup> )	Однотипные ямки травления в виде затуманенных (черных) треугольников	Повышенная дефектность кремниевых подложек, повышенные температурные градиенты, пластические деформации
9.	Нарушение четкости фотолитографического рисунка (рельеф скрытых слоев)	Искривление границ рельефа топологического рисунка подложки («сугробы»)	Заниженная температура роста пленки
10.	Механические дефекты	Царапины, точки, сколы, загибы	Прирастание пластины к подложкодержателю, субъективный фактор

### Выполнение работы

*Оборудование:* пинцет; источник сфокусированного света; ме-

таллографический микроскоп МЕТАМ-1 в комплекте с микрометром.

*Материалы:* образцы эпитаксиальных структур на монокристаллических подложках кремния различного типа (подготовленные к структурным исследованиям в производственных условиях).

Выполнение задания заключается в исследовании предложенных кремниевых пластин с нанесенным эпитаксиальным слоем кремния, а также подборе и расчете технологических параметров формирования таких структур. Работа включает следующие этапы:

1. Определение параметров исходных кремниевых пластин по базовому и дополнительным срезам с использованием приложения 1.

2. Исследование предложенных пластин визуально с помощью оптического микроскопа. Определение и описание типа установленных дефектов и видов брака с использованием таблицы 2 и измерение характерных геометрических размеров дефектных областей.

3. Анализ причин и способов устранения установленных видов брака. Заполнение таблицы данных 3.

Таблица 3

№ п/п	Эскиз и маркировка пластины	Тип проводимости, природа и концентрация примеси	Характеристика (изображение и размеры) дефекта	Вид брака	Причины и способы устранения брака
1.					

4. Получение задания для разработки технологического цикла наращивания эпитаксиальной пленки кремния. Шифровка эпитаксиальной структуры.

5. Выбор основных технологических параметров (состав газовой смеси, температура, скорость роста) процесса выращивания пленки заданной толщины с использованием таблицы 1 и рисунков 1 - 3.

6. Расчет продолжительности процесса с учетом подготовительных, основных и заключительных стадий.

7. Расчет расходов (л/мин) всех компонентов газовой смеси (источник кремния, источник примеси, газ-восстановитель, газ-носитель в соответствующих случаях) для стадии выращивания эпитаксиальной пленки.

### Контрольные вопросы

1. Эпитаксиальные процессы в интегральной технологии (назначение, возможности). 2. Разновидности эпитаксии (газовая, жидкостная, молекулярно-лучевая). 3. Химические основы хлоридно-гидридного ме-

тода эпитаксиального наращивания кремния. 4. Технологические особенности различных методов получения кремниевых пленок (источники кремния и примеси, температура, скорости и др.). 5. Виды брака эпитаксии кремния. 5. Порядок подбора и расчета и технологических параметров получения эпитаксиальных легированных слоев кремния.

### Литература

1. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – с. 131-178. 2. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Высшая школа, 1987. – с. 140 – 163. 3. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., кн.1. – 1986. – с.72 – 119.

### Лабораторная работа № 3.

#### **Изучение влияния состава рабочей среды на процессы термического окисления кремния**

Цель работы: изучение особенностей окисления монокристаллического кремния в воздушной среде в различным содержанием паров воды, определение ряда технологических параметров операции формирования термической пленки  $\text{SiO}_2$  на поверхности кремния.

#### **Теоретические сведения**

В современной микроэлектронике кремний пока остается основным материалом в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). Это во многом связано с уникальным сочетанием физико-химических свойств его оксида  $\text{SiO}_2$ , что обуславливает широкое применение  $\text{SiO}_2$  в качестве универсального многофункционального диэлектрика. Среди примеров применения  $\text{SiO}_2$  можно выделить его использование в качестве *функционального диэлектрического слоя* в полевых транзисторах со структурой металл-диэлектрик-полупроводник или МОП-транзисторах, *электрической изоляции* активных и пассивных элементов ИС, а также межслойной изоляции многоуровневой металлизации, *маски* и источника диффузанта в процессах локального легирования полупроводниковой подложки, *защитного или пассивирующего покрытия*, предохраняющего поверхность полупроводника от воздействия внешних факторов (реагенты, температура, излучение и др.), *геттерирующих слоев*, обеспечивающих удаление нежелательных примесей и дефектов из активных областей полупроводниковых приборов

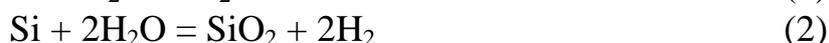
Пленки, используемые для указанных целей, должны удовлетворять ряду требований по своим электрофизическим свойствам. Наиболее важными электрофизическими параметрами при этом являются удельное сопротивление пленки, пробивное напряжение и электрическая прочность (величина напряженности электрического поля, при которой происходит пробой), относительная диэлектрическая проницаемость, плотность поверхностных состояний, степень стабильности поверхностного заряда и др. Важное значение имеет термическая и химическая стойкость. В зависимости от назначения пленки требования к этим параметрам оказываются различными. Так, для пассивирующих пленок необходимо, чтобы относительная диэлектрическая проницаемость была предельно минимальной, ибо в противном случае паразитная электрическая емкость между металлическими пленочными линиями и полупроводниковой пластиной может оказаться значительной. В то же время для диэлектрика затвора МОП-транзисторов относительная диэлектрическая проницаемость должна быть максимальной для создания эффективного управляющего поля между затвором и полупроводником. Для маскирующих покрытий важна селективность по отношению к определенным технологическим факторам (реагентам, плазме, температуре и др.), отсутствие дефектов, адгезия к подложке. Во всех случаях пленка должна быть однородна по структуре и составу, что наиболее полно реализуется в аморфных слоях.

Оксид кремния представляет собой широкозонный диэлектрик (ширина запрещенной зоны  $E_g$  равна 8,1 эВ). Величина его собственной электропроводности при комнатной температуре составляет  $10^{-18}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Многие исследователи считают, что границу раздела монокристаллического Si и аморфной пленки SiO<sub>2</sub>, полученной при термическом окислении кремния следует рассматривать как некоторый переходный слой с переменным химическим составом. Предполагается, что на границе монокристаллического кремния находится моноатомный слой нестехиометрического SiO<sub>x</sub> ( $1 < x < 2$ ), представляющий собой не полностью окисленный кремний. Затем следует промежуточный слой SiO<sub>2</sub> с большими внутренними механическими напряжениями толщиной 1 – 4 нм, который переходит в обычный ненапряженный стехиометрический аморфный SiO<sub>2</sub>. Однако в термически выращенном SiO<sub>2</sub> всегда обнаруживается положительный заряд. В результате в прилегающей области кремния индуцируется отрицательный заряд. Положительный заряд в оксиде может проявляться в виде

заряженных фиксированных состояний на поверхности или заряда на границе раздела, подвижного заряда в оксиде, заряженных быстрых поверхностных состояний, а также ловушек в оксиде, индуцируемых, например, с помощью радиационного облучения. Накопление зарядов характеризуется выраженной нестабильностью, что вызывает значительную нестабильность выходных параметров приборов.

#### *Получение пленок SiO<sub>2</sub> методом окисления кремния*

Сущность метода термического окисления сводится к окислительной обработке поверхности кремниевых пластин в среде *сухого, влажного кислорода* или *парах воды* при повышенной температуре. Суммарные реакции происходящих химических превращений при такой обработке кремния отражаются уравнениями:



Процесс окисления осуществляется обычно при температурах от 900 до 1350°C. Многочисленными экспериментальными исследованиями было показано, что процесс термического окисления кремния складывается из следующих наиболее важных элементарных актов:

- 1) диффузии окислителей из газового потока к поверхности кремния;
- 2) адсорбции окислителей на поверхности кремния;
- 3) диффузии окислителей через оксидный слой (коэффициент диффузии кислорода и воды в SiO<sub>2</sub> значительно выше коэффициента диффузии Si в SiO<sub>2</sub>);
- 4) химического взаимодействия окислителей с кремнием на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>;
- 5) отвода газообразных продуктов реакции (при участии воды).

Как известно, в общем виде *кинетический закон роста* оксидной пленки имеет линейно-параболический вид:

$$d_{\text{пл}}^2 + Ad_{\text{пл}} = Bt \quad (3)$$

где  $d_{\text{пл}}$  – толщина пленки;

$t$  – время роста;

$A, B$  – константы линейного и параболического роста соответственно. На практике предельный линейный случай кинетического контроля, когда толщина пленки линейно пропорциональна времени окисления, реализуется на первом этапе окисления, когда поверхность кремния свободна или покрыта тонким оксидом, а также при температурах окисления менее 1000 °C. Значительная доля окисления

протекает в соответствии с параболическим законом  $d_{\text{пл}}^2 = Bt$ . Наиболее сложно поддается математическому описанию окисление во влажном кислороде, когда в процессе участвуют два окислителя –  $O_2$  и  $H_2O$ . Закон роста оксида зависит также от температуры окисления: при пониженных температурах выполняется линейный закон, а при повышенных – параболический. Следует отметить, что окисление в среде влажного кислорода или парах воды при прочих равных условиях протекает с существенно большей скоростью, чем в среде сухого кислорода (рис. 1), несмотря на то, что скорость диффузии кислорода в несколько раз больше скорости диффузии паров воды в пленке диоксида кремния. Это объясняется тем, что в условиях влажного кислорода поверхностная равновесная концентрация окислителя значительно больше (на три порядка), чем в условиях сухого кислорода.

При изучении кинетики процесса образования оксидной пленки в среде водяного пара был выявлен любопытный факт. С повышением давления пара в реакционном объеме скорость роста окисного слоя снижается, и при некотором критическом давлении рост пленки прекращается. По мнению исследователей, это обусловлено растворением оксида в водяном паре. Вероятность растворения  $SiO_2$  в водяном паре высокого давления подтверждается образованием слоя оксида, осаждающегося на внутренних стенках реакционного сосуда после его охлаждения и вскрытия.

Кроме температуры и давления окислителя, на скорость окисления существенное влияние оказывает концентрация примеси в подложке. Так, например, при окислении пластины кремния с поверхностной концентрацией фосфора  $10^{21} \text{ см}^{-3}$  при  $850^\circ\text{C}$  и давлении водяно-

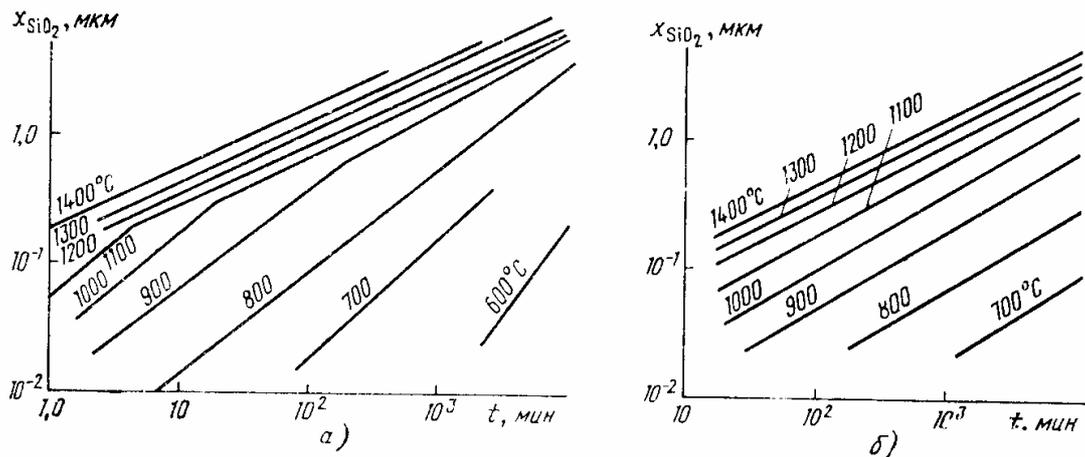


Рис. 1. Температурная зависимость роста оксидной пленки на кремнии в среде водяного пара (а) и сухого кислорода (б)

го пара 120 ат за 1 час образуется слой толщиной 2мкм. При окислении кремния, не содержащего примесей, в тех же условиях образуется пленка толщиной лишь 0,35 мкм. Легирование бором в широком температурном интервале увеличивает коэффициент диффузии окислителей и соответственно скорость окисления.

Кристаллографическая ориентация поверхности кремния также влияет на скорость окисления. Так, скорость роста оксидной пленки во влажном кислороде при 1000°C в области линейного участка зависимости скорости роста оксидного слоя от времени для грани (100) составляет 0,502, для (110) – 0,577 и для (111) – 0,580 нм/с, т.е. по грани (111) окисление осуществляется на 13% быстрее, чем по грани (100). Однако плотность поверхностных состояний на границе раздела оксид – кремний ориентации (100) – наименьшая, что выгоднее для технологического процесса создания приборов на полупроводниковом кремнии.

На ряду с влажным окислением еще одной разновидностью «скоростного» окисления является *пирогенное окисление* кремния. Суммарный процесс пирогенного окисления описывается уравнением (2). Собственно пирогенным является этап получение паров воды вне реактора окисления при взаимодействии водорода и кислорода. Такой метод гарантирует получение высокочистых паров воды благодаря высокому уровню очистки исходных газов и синтезу воды в непосредственной близости от реактора. Получение паров воды осуществляется в кварцевой колбе – горелке, которая находится вне реактора, для чего подаваемый водород подогревается до воспламенения в атмосфере кислорода. Температура в зоне поджига водорода должна быть не менее 700°C. Соотношение расходов водорода и кислорода должно быть не более 1.8:1. Температура пирогенного окисления составляет обычно 800°C. В ходе процесса в реактор кроме образующихся паров воды, подается кислород для сжигания водорода, выделяющегося при окислении. Время окисления, например, для формирования подзатворного диэлектрика толщиной 80 нм составляет 30 минут. Пример одного из производственных режимов проведения операции "окисление под затвор" приведен в таблице 1.

По своим физическим и химическим свойствам оксидные пленки, полученные термическим окислением кремния, близки к стекловидному кремнезему. Они растворимы только в плавиковой кислоте, имеют удельное электрическое сопротивление примерно  $10^{16}$  Ом\*см

при 25°C, обладают электрической прочностью  $5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$  В/см, диэлектрической проницаемостью примерно 3,7. Показатель светопреломления составляет 1,458 – 1,462, в то время как для кварцевого стекла он равен 1,459. Присутствие паров воды способствует дефектообразованию в оксидных слоях. Для улучшения свойств оксида и кремниевой подложки при окислении в газовую среду вводят галогены (например, HCl). При этом увеличивается диэлектрическая прочность, уменьшается плотность поверхностных состояний, а также уменьшается содержание примесей (например, натрия) в пленке (за счет образования летучих хлоридов), то есть обеспечивается эффект геттерирования нежелательных примесей. Введение HCl в окислительную среду сухого кислорода на несколько процентов увеличивает скорость окисления, а в пары воды – в той же мере уменьшает скорость роста пленки.

Таблица 1

**Режим выполнения операции "окисление под затвор"**

Наименование операции	Температура в рабочей зоне, °С			Время, мин.	Температура газа, °С	Расход газов, л/ч		
	Загр.	Центр	Газ			N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Начало	750±5	750±5	750±5					
Герметизация	750±5	750±5	750±5	1		100		
Продувка	750±3	750±3	750±3	5		1400		
Загрузка	750±20	750±50	750±25	20		1400		
Прогрев	750	750	750	10		700		
Нагрев1	790±10	790±10	790±10	10		700		
Нагрев2	815±10	800±10	810±10	5		700		
Стабилизация	815	800	810	10	800	700		
Поджиг	815±1	800	810±2	1	800	100	700	75
Горение	815±1	800±1	815±2	2	800	100	750	250
Пир.окисление	815±1	800±1	810±21	30	800	100	750	250
Гашение	815±1	800±1	810±2	2	800	100	700	75
Охлажд.	650±10	650±10	650±10	60	700			
Выгрузка	650±10	650±50	650±25	20	700			

К недостаткам термического оксида кремния следует отнести высокие температуры обработки, что приводит к автолегированию и изменению параметров распределения примесей в активных областях полупроводниковых структур. Окисление поверхности кремния в потоке очень сухого кислорода с содержанием воды, меньшим  $10^{-7}$  г/л, при температурах 900 – 1200°C и давлении 1 ат приводит к образованию более чистого оксида. Однако следует иметь в виду, что окисление в среде сухого кислорода производится в течение длительного времени с малой скоростью. В этих условиях при высоких температурах и при недостаточной очистке поверхности кремния перед окислением в пленке возможно образование кристаллических участков с микротрещинами, что снижает ее защитные свойства.

Выбор способа окисления зависит от назначения оксида. Скорость окисления в водяном паре выше, следовательно, для получения толстых пленок этот метод предпочтительнее. При необходимости получать тонкие оксидные пленки высокой плотности с минимальным зарядом на границе кремний-оксид предпочтение отдается окислению в среде сухого кислорода. Пленки толщиной более 0,5 мкм формируют во влажном кислороде. Присутствие HCl в рабочей среде уменьшает содержание ионов натрия в оксиде. Достаточно-толстые пленки получают в технологическом цикле «сухой – влажный – сухой» (толщина оксида соответственно 0,1 мкм - 0,5 мкм – 0,1 мкм), что позволяет сочетать хорошую скорость и требуемое качество оксида.

Среди прямых методов получения  $\text{SiO}_2$  можно назвать *электрохимическое окисление* кремния. Процесс проводят либо в специальной электролитической ячейке, либо в кислородсодержащей низкотемпературной плазме. Электролитом служит деионизованная вода, органические растворители, высшие спирты, гликоли. Неорганические компоненты добавляются для регулирования проводимости. Анодом является кремний. Подавая определенное напряжение на электроды (до 300 - 400 В), создают условия для осуществления, например, диссоциации молекул воды с образованием атомарного кислорода, который окисляет кремниевый анод. Окисление кремния р-типа может быть осуществлено в растворе азотной или фосфорной кислоты, в н-метилацетамиде при плотности тока  $7 \text{ mA/cm}^2$ . При этом, только 54 мкА, т.е. 0,8%, расходуется на окисление, а в основном ток расходуется на электролиз электролита. Электрические и маскирующие характеристики анодных пленок не выше оксидов, полученных во

влажном кислороде. Лучшими характеристиками обладают пленки, сформированные с помощью *низкотемпературного ионно-плазменного окисления*. Скорость такого окисления составляет 8-10 нм/мин.

#### *Осаждение пленок диоксида кремния*

Существует несколько способов получения пленок  $\text{SiO}_2$  осаждением в вакууме. Пленки могут быть получены методом *термовакuumного испарения, катодного, ионно – плазменного и реактивного распыления*. В случае термовакuumного испарения оксидные мишени (в частности,  $\text{SiO}_2$ ) подвергаются термической диссоциации. Это приводит к тому, что состав осажденных пленок существенно отличается от состава исходного оксида. Распад оксидов происходит тем интенсивнее, чем больше разница между величинами давления диссоциации оксида и давления кислорода в вакуумной системе. Принято считать, что для получения пленки  $\text{SiO}_2$  оптимальное остаточное давление должно составлять  $10^{-4}$  мм. рт. ст. Разложение оксидов при испарении в вакууме может быть обусловлено не только термической диссоциацией. Оно также может быть следствием химического взаимодействия оксида с материалом испарителя или тигля. Например, для понижения скорости процесса восстановления диоксида кремния материал испарителя покрывают слоем платины или палладия. Использование покрытий из благородных металлов иногда на два порядка снижает скорость восстановления оксида. Тем не менее в процессе вакуумного испарения  $\text{SiO}_2$  частично восстанавливается до  $\text{SiO}$ . Если содержание  $\text{SiO}$  в пленке диоксида кремния недопустимо, то напыленную в вакууме оксидную пленку подвергают кратковременной термоокислительной обработке для перевода  $\text{SiO}$  в  $\text{SiO}_2$ .

Отмеченные трудности получения оксидных пленок в условиях термовакuumного испарения отсутствуют при использовании ионно-плазменного или реактивного распыления. В качестве мишени при получении пленок  $\text{SiO}_2$  ионноплазменным методом используют плавленый кварц. При реактивном распылении исходным материалом является кремний. Скорость осаждения пленок  $\text{SiO}_2$  этими методами может быть доведена до 100 нм/с и более.

В технологии полупроводниковых приборов и схем широко применяются методы осаждения  $\text{SiO}_2$  из рабочей среды, содержащей газообразный источник кремния. Для этого используют реакции пи-

ролиза, окисления или гидролиза легколетучих соединений кремния в соответствии со схемами:



Наиболее широко распространен пиролиз кремнийоксиорганических соединений, при котором в качестве твердого продукта реакции выделяется  $\text{SiO}_2$ . Достоинствами этого метода являются высокая однородность, высокое качество пленки и воспроизводимость рельефа. Однако повышенные температуры процесса и выделение углеводородных радикалов затрудняют использование этого метода для пленки  $\text{SiO}_2$  в контакте с алюминиевой металлизацией. Слои  $\text{SiO}_2$  поверх алюминия предпочтительнее осаждают более низкотемпературным силановым методом (реакция 5), хотя в этом случае плохо воспроизводится рельеф и происходит осаждение хлопьевидного продукта на стенках реактора. Температура около  $350^\circ\text{C}$  необходима для уплотнения пленки и удаления воды. Процесс (6) возможен даже при комнатной температуре. Однако на практике его ведут при  $500-550^\circ\text{C}$ , чтобы уплотнить образующийся рыхлый осадок  $\text{SiO}_2$ . Дополнительную термообработку (около  $900^\circ\text{C}$ ) часто применяют для улучшения свойств пленки  $\text{SiO}_2$  во всех методах осаждения. Процессы (5)-(6) возможно проводить в установке эпитаксиального наращивания кремния, что уменьшает загрязнение слоев посторонними примесями.

При выборе метода получения пленки  $\text{SiO}_2$  необходимо учитывать назначение слоя, скорость роста, физико-химические особенности образующейся в данном методе пленки (таблица 2), структуру, на которой формируется оксид, и другие требования.

#### *Свойства и получение нитрида кремния*

Промышленное применение нитрида кремния в технологии полупроводниковых приборов и схем активизировалось после выявления хороших пассивирующих свойств этого материала в МОП-структурах. В сравнении с оксидом кремния (таблица 3)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обладает повышенной диэлектрической проницаемостью, лучшими маскирующими свойствами, а также более высокой химико-термической стабильностью. Однако  $\text{Si}_3\text{N}_4$  характеризуется повышенной плотно-

стью заряда на границе с кремнием и затрудненностью процессов травления. Хорошее сочетание свойств диэлектриков можно достичь в многослойных пленках  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Таблица 2

Свойства пленок  $\text{SiO}_2$ , полученных различными методами

№ п. п.	Метод получения	Температура, °С	Скорость роста, нм/мин	Плотность, г/см <sup>-3</sup>	Уд. сопротивление, Ом·см	Диэл. прочность, ·10 <sup>6</sup> В/см	Отн. диэл. проницаемость	Скорость травления в HF, нм/мин
1.	Сухое окисление	1200	0,8	2,25	10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup>	9	3,4	80
2.	Окисление в парах воды	800	0,5	2,1	10 <sup>15</sup> -10 <sup>17</sup>	2	3,2	100
3.	Анодное окисление	Без нагрева	зависит от плотности тока (5–10 мА/см <sup>2</sup> )	1,8	10 <sup>12</sup> -10 <sup>16</sup>	5,2-20	-	300-450
4.	Реактивное напыление	200	до 30	2,2-2,3	10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup>	6-10	2,5	-
5.	Пиролиз ТЭОС $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	750	до 100	2,2	10 <sup>15</sup> -10 <sup>16</sup>	10	3,4	3
6.	Силановый метод	300	50	2,1	10 <sup>14</sup> -10 <sup>16</sup>	10	3	6

На практике для получения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  прямое азотирование кремния не используется в силу высоких температур и малых скоростей такого процесса.

Таблица 3

Свойства нитрида и диоксида кремния

Материал	$E_g$ , эВ	Относ. диэл. проницаемость	Показатель преломления	Элек. прочность, В/см	Коэф. диф. На, см <sup>2</sup> /с	Миним. плотность заряда на границе с Si, см <sup>-2</sup>
$\text{SiO}_2$	8	4	1,5	10 <sup>7</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>10</sup>
$\text{Si}_3\text{N}_4$	4,5	6-9	2	10 <sup>7</sup>	10 <sup>-18</sup>	10 <sup>12</sup>

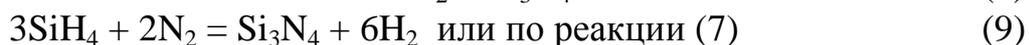
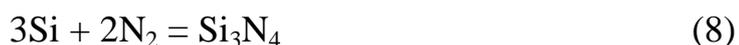
В технологических маршрутах применяют в основном два способа формирования  $\text{Si}_3\text{N}_4$ :

1) Аммонолиз силана (или тетраглорида кремния, или дихлорсилана)



Этот метод характеризуется скоростью около 10 нм/мин при температурах 700-900 °С. Повышение температуры увеличивает плотность и маскирующую способность диэлектрика.

2) Вакуумные методы (катодное распыление, плазмохимическое осаждение)



Для данных методов наблюдается повышенное содержание водорода в пленке (десятки ат.%), пониженная плотность, сопротивление и электрическая прочность. Положительными особенностями являются пониженные температуры (около 300°С при сохранении скорости на уровне нескольких нм/мин), что позволяет использовать нитрид кремния в качестве пассивирующего покрытия для готовой структуры прибора.

### Выполнение работы

*Оборудование:* фторопластовая и стеклянная посуда для химической обработки и промывки образцов; тигли для высокотемпературной обработки (с металлической оснасткой для фиксации пластин); пинцет; сушильный шкаф; аналитические весы; высокотемпературная печь.

*Материалы:* образцы монокристаллического кремния; дисциллированная вода; толуол (этанол); HF; фильтровальная бумага.

Работа заключается в проведении и обработке результатов экспериментов по окислению кремния в условиях различной влажности окислительной атмосферы. Она включает следующие этапы:

1. Подготовка тигля и металлической оснастки (изготовление необходимых элементов из металлической фольги, обезжиривание в щелочном растворе, сборка «влажного» блока).

2. Подготовка фрагментов кремниевых пластин (обезжиривание, сушка, взвешивание на аналитических весах).

3. Проведение отжига пластин в соответствии с заданием преподавателя ( температура 800-1100 °С, время 1-3 часа) с термохронметрическим контролем.

4. Взвешивание образцов после отжига.

5. Определение толщины пленки методом цветовых оттенков

Ньютона (методика приведена в приложении 2).

6. Построение температурной кривой процесса окисления по данным термохронометрии.

7. Расчет толщины оксидной пленки и скорости окисления для «влажного» и «сухого» окисления. Анализ полученных результатов и сопоставление с литературными сведениями (рис.1).

### **Контрольные вопросы**

1. Назначение оксидных слоев в технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем. 2. Методы получения пленок  $\text{SiO}_2$  при окислении кремния (сухое, влажное, пирогенное окисление). 3. Сравнительная характеристика технологических параметров окисления кремния и свойств получаемых пленок. 4. Вакуумные и другие методы осаждения пленок  $\text{SiO}_2$ . 5. Выбор метода получения  $\text{SiO}_2$  для формирования пленок заданного качества и назначения. 5. Использование и получение пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

### **Литература**

1. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Высшая школа, 1987. – с. 97 – 112. 3. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., кн.1. – 1986. – с.174 – 211. 3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1991. – с. 145 – 149.

### **Лабораторная работа № 4.**

#### **Изучение завершающих операций технологического цикла фотолитографии.**

Цель: исследование влияния состава реагентов, температуры и продолжительности обработки на скорость и качество проведения операций травления электропроводящего покрытия и снятия фоторезиста в процессе фотолитографии на стеклянных подложках.

#### **Теоретические сведения**

В научно-технической литературе фотолитография определяется как процесс формирования на твердотельной поверхности рельефного (сегментного) покрытия с изображением определенных элементов с помощью шаблона и слоя светочувствительного химически стойкого материала, а также последующего переноса этого изображения из слоя на подложку. Буквальный перевод слова «фотолитография», имеющего греческое происхождение, означает «изготовление

рисунка (“графо-”) с помощью света (“фотос”) на камне (“литос”). Наряду с фотолитографией в современных производствах формирования сегментных слоев используются другие виды литографических процессов такие, как электроно-, рентгено-, ионно-лучевая, лазерная литографии. Эти технологии позволяют во многом решить проблемы качества и размера рисунков, но характеризуются пониженной производительностью.

Литографические процессы стали возможны благодаря разработке резистов – материалов, способных заметно изменять свои физико-химические свойства при определенных внешних воздействиях. Фоторезисты (ФР) – светочувствительные полимерные композиции, в которых под действием света протекают необратимые химические процессы, приводящие к изменению их свойств. Внешним проявлением действия света на такие композиции является изменение характера их растворимости. ФР выполняет в процессах фотолитографии две функции:

–позволяет переносить изображение с шаблона на подложку за счет отличающихся свойств засвеченных и незасвеченных участков;

–защищает заданные элементы рисунка при травлении подложки.

По способу перенесения изображения (рис. 1) ФР разделяют на негативные (рисунок шаблона – негатив изображения на подложке) и позитивные (рисунок шаблона – позитив изображения на подложке). При облучении в пленках негативных ФР происходит реакции фотоприсоединения – фотополимеризации, а в позитивных – фоторазложения – фотолиза. В результате растворимость *засвеченных* участков *негативных* ФР *уменьшается* за счет поперечной сшивки молекул полимера ФР, а *позитивных* - *увеличивается* за счет разрыва наиболее слабых связей с образованием активных функциональных групп.

В состав ФР обычно входят:

–светочувствительный компонент (сенсебилизатор, т.е. группа,

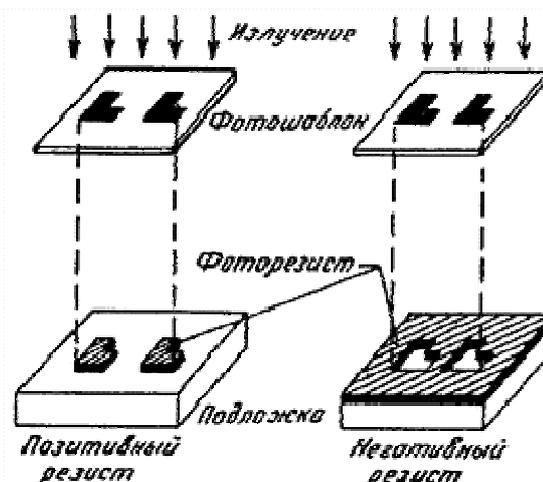


Рис. 1. Перенос рисунка с использованием позитивного и негативного резиста

- включающая светочувствительную двойную связь C=C, C=N и др.);
- пленкообразующее вещество (полимерная основа);
- растворитель (кетоны, спирты, диметилформамид и др.)

В качестве основы *негативных* фоторезистов (ФН) чаще используют сложный эфир поливинилового спирта  $(\text{—CH}_2\text{—CHON—})_n$  и коричной кислоты  $\text{C}_6\text{H}_5\text{—CH=CH—COOH}$ , который называют поливинилциннамат (ПВЦ). При облучении в таких материалах происходит разрыв двойной связи в циннамоильной группе и *сшивка* спиралевидной длинной молекулы ПВЦ в химически стойкую трехмерную структуру.

Наиболее распространенный *позитивный* ФР в качестве основного компонента включает сложный эфир 1,2-нафтохинондиазид - 5-сульфо кислоты (ДХ на рис. 2) и новолака  $(\text{—C}_6\text{H}_5\text{OH—CH}_2\text{—})_n$ .

Под воздействием фотонов (рис. 2) в таком эфире происходит разрыв связи  $\text{C=N}_2$  в сенсебилизаторе (ДХ) и перестройка (*деструкция*) гексацикла в пентацикл с последовательным образованием карбена (С), затем кетена (К). Кетен реагирует с поглощенной влагой, присутствующей в смоле, с образованием иденкарбоновой кислоты (А), которая имеет повышенную растворимость в щелочных растворах.

Позитивные резисты на основе новолачных смол имеют ряд су-

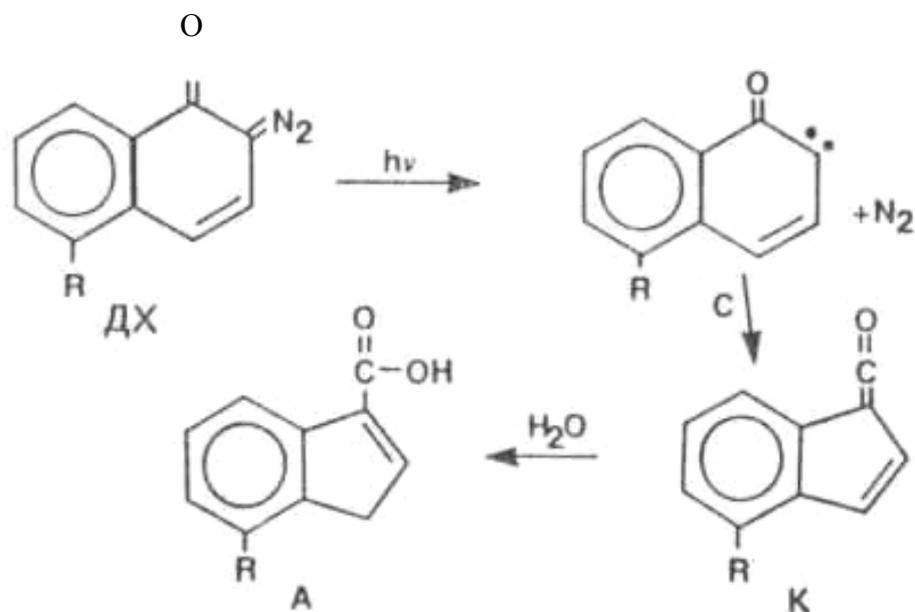


Рис. 2. Схема фотостимулированных превращений в позитивном фоторезисте на основе нафтохинондиазида

ществленных преимуществ по сравнению со сшивающимися негативными резистами:

1. При проявлении водным раствором щелочи (без набухания) в первую очередь анизотропно растворяются наиболее сильно засвеченные внутренние области изображений, а внешние области, экспонированные рассеянным излучением, растворяются незначительно. Негативные же резисты проявляются со стороны этих внешних областей, которые в случае сшивающихся резистов не растворяются из-за набухания. Максимально достижимое аспектное соотношение для негативных фоторезистов составляет 1:1. Кроме того, их проявители экологически вредны.

2. Не чувствительны к кислородному ингибированию фотохимических реакций.

3. Имеют наилучшую среди обычных резистов плазмостойкость благодаря наличию фенольных компонентов в смоле.

4. Могут быть термически стабилизированы до 200 °С.

5. Допускают допроявление, легко удаляются, пригодны для взрывной литографии.

6. Могут использоваться для двуслойных резистных систем в качестве маски, стойкой в плазме O<sub>2</sub>.

7. Возможно обращение изображений для получения негативного изображения.

Главными недостатками указанных позитивных резистов являются малый допуск на параметры проявления при умеренных и малых дозах экспонирования, а также плохая адгезия к поверхности кремния, что вызывает необходимость специальной обработки подложки перед нанесением.

К важнейшим параметрам фоторезистов относятся следующие:

1. Светочувствительность – величина, обратная экспозиции (количеству световой энергии), требуемой для перевода фоторезиста в растворимое (для ФП), или нерастворимое (для ФН) состояние. После экспонирования проявитель взаимодействует как с облученными, так и с необлученными участками, поэтому процесс проявления существенно влияет на светочувствительность. Светочувствительность определяют экспериментально, измеряя скорость проявления фоторезиста в зависимости от степени его облучения.

2. Разрешающая способность – максимальное количество линий одинаковой ширины, разделенных промежутками той же ширины, ко-

торые можно получить в данном фоторезисте на отрезке длиной 1 мм. Разрешающую способность определяют также экспериментально с помощью специальных фотошаблонов со штриховым рисунком различного шага.

3. Стойкость к воздействию агрессивных сред (например, кислотостойкость).

4. Стабильность эксплуатационных свойств во времени (срок службы при правильных условиях хранения и эксплуатации).

Важными характеристиками фоторезистов являются спектры поглощения, которые определяют тип источников экспонирования и помогают выбрать материал для экранирования пластин с фоторезистом от засвечивания при хранении.

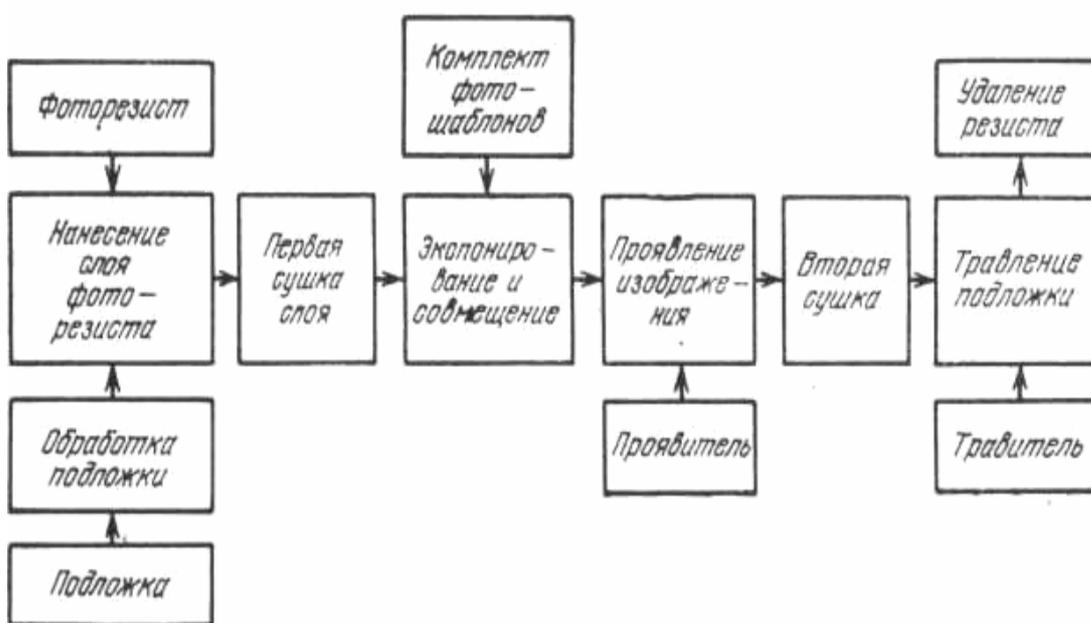


Рис. 3. Схема технологического цикла фотолитографии

Технологический цикл процесса фотолитографии (рис. 3) включает множество операций, которые можно разделить на несколько блоков:

–формирование на поверхности подложки слоя фоторезиста (операции подготовки подложки, приготовления и нанесения фоторезиста, термообработка (сушка) нанесенного слоя);

–передача изображения с фотошаблона на слой фоторезиста (операции совмещения фотошаблона и пластины, экспонирование слоя фоторезиста ультрафиолетовым излучением, проявление рисунка

в слое фоторезиста, термообработка этого рельефного слоя (задубливание));

–формирование соответствующего рельефного рисунка на подложке (операции локального травления подложки через маску фоторезиста, удаление сегментного слоя фоторезиста).

В данной лабораторной работе изучаются технологические особенности проведения заключительных операций фотолитографии, а именно локального травления подложки, снятия фоторезиста и контроля качества литографического рисунка на примере производства жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ). Объектами локального травления в этом случае являются электропроводящие покрытия состава  $\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$  с преобладанием оксида индия (пленки ИТО) на поверхности стеклопластин. В результате проведения фотолитографии на стеклянных подложках формируются проводящие сегменты, обеспечивающие отображение знаковой информации в жидкокристаллических устройствах, которые все шире используются как в обычных наручных электронных часах, так и в экранах современных компьютеров и других электронных приборах.

Основными требованиями, предъявляемыми к очень важной операции травления, являются:

–малое отношение скорости горизонтального травления к скорости вертикального травления;

–высокая селективность травителя;

–низкое газовыделение;

–приемлемая скорость травления.

Наиболее доступным способом локального травления в производстве ЖКИ при использовании позитивных фоторезистов остается в настоящее время химическая обработка в кислотных растворах, которая обеспечивает достаточно высокую скорость травления, но не обеспечивает требуемое качество в случае высокой плотности рисунка (например, для жидкокристаллических экранов и дисплеев) или повышенного содержания оксида олова в покрытии (свыше 10 мол.%). В последних случаях необходимо либо подбирать эффективные катализаторы травления, либо использовать дорогостоящую плазмохимическую обработку.

Травление ИТО может осуществляться в различных растворах (табл.1). Наиболее распространенным травителем является концентрированная соляная кислота, в которую вводят некоторые активирующие добавки.

Таблица 1

Скорость травления ИТО в различных травителях при температуре 50 °С

Состав травителя	Скорость травления, нм/мин
6М CH <sub>3</sub> COOH	Менее 0.1
6М H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	около 0.3
2.2М HOOC—COOH	около 0.3
6М HNO <sub>3</sub>	2.0
6М H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	около 0.2
6М HCl	19
6М HBr	18
6М HI (в присутствии I <sub>2</sub> )	90
6М HClO <sub>4</sub>	0
6М HCl+0.1М I <sub>2</sub>	33
6М HCl+0.2М FeCl <sub>3</sub>	50

Механизм химического травления ИТО составляет в настоящее время задачу научных исследований и дискуссий. Приводятся, в частности, данные о том, что активной реакционной частицей в данном процессе является недиссоциированная молекула галогеноводородной кислоты, а продуктами растворения являются растворимый галогенидный комплекс металла покрытия (индия) и вода. При этом предполагается, что происходит синхронный разрыв связей In—O и H—Cl, а также образование связей In—Cl и H—O. Следует учитывать, что оксид олова устойчив к воздействию приведенных в таблице 1 кислот, поэтому его содержание свыше 10-15 мол.% значительно затормаживает процесс травления. Для увеличения скорости травления на производстве обычно используют повышенные температуры вплоть до 40-50 °С.

Качество операций травления слоя подложки и удаления ФР значительно влияет на качество последующих операций. В настоящее время химические “мокрые” методы осуществления этих операции вытесняются более чистыми и точными “сухими” методами такими, как ионно-лучевая и плазмо-химическая обработка фоторезиста в кислородсодержащей среде.

### Выполнение работы

*Оборудование:* фторопластовая и стеклянная посуда для хими-

ческой обработки и промывки образцов; пинцет; термометр; электрическая плитка; сушильный шкаф; металлографический микроскоп МЕТАМ-1 в комплекте с микрометром, вольтметр.

*Материалы:* образцы стеклопластин *C1* (нанесен слой  $\text{SiO}_2$ , ИТО (содержание Sn 5 %), позитивного фоторезиста, прошедшего экспонирование и проявление) и образцы стеклопластин *C2* без фоторезиста (нанесен слой  $\text{SiO}_2$ , ИТО (содержание Sn 5 %)); дисциллированная вода; толуол (этанол);  $\text{HCl}$ ;  $\text{HNO}_3$ ;  $\text{NaOH}$ ;  $\text{FeCl}_3$ ; фильтровальная бумага.

Выполнение работы включает следующие опыты.

1. Приготовить растворы азотной, соляной чистой и с различным добавлением хлорида железа кислот в соответствии с таблицей 1 и заданием преподавателя, а также 1-10 % растворы щелочей .

2. Определить предполагаемое время травления покрытия толщиной около 100 нм по таблице для каждого травителя.

3. Провести эксперименты по травлению образцов *C1* в приготовленных травителях при различной продолжительности операции (диапазон длительности травления в пределах  $t_{\text{табл.}} \pm 50\%$ ). Шаг варьирования продолжительности обработки задается преподавателем. Эксперименты при более высокой продолжительности осуществляются на тех же пластинах путем необходимой дополнительной обработки.

**Внимание!** Используемые растворы являются высоко агрессивными. При работе следует соблюдать осторожность. В непосредственной близости от емкости с кислотой должен располагаться стакан с дисциллированной водой для непроточной промывки, после которой следует провести промывку в проточной воде.

4. Для указанного травителя провести эксперименты при различных температурах (35, 40, 45, 50 °C). Для определения скорости травления используются образцы *C2*. Полнота удаления электропроводящего покрытия фиксируется по увеличению поверхностного сопротивления стеклопластины.

5. Провести эксперименты по удалению слоя фоторезиста в режиме периодических хронометрированных погружений с целью точного определения длительности операции удаления фоторезиста. Эксперименты проводятся в приготовленных растворах  $\text{NaOH}$  или  $\text{KOH}$ . Степень удаления фоторезиста контролируется визуально по исчезновению желто-коричневых сегментов с поверхности пластины.

5. Проконтролировать качество травления с помощью оптиче-

ского микроскопа, предварительно осуществив снятие фоторезиста в 10-% NaOH. Качественно протравленными являются пластины с контрастным четким рисунком с ровными краями. Браком являются недотравы (неконтрастный рисунок), перетравы и подтравы (неровные края сегментов, наличие вытравленных очагов внутри сегментов). Результаты наблюдений отражаются в виде эскизов.

6. По данным экспериментов оценить экспериментальную скорость (для С2) и качество (для С1) травления в различных условиях. Провести анализ по влиянию технологических параметров на особенности травления пленок ИТО на стеклопластинах и представить результаты в таблице 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов локального травления ИТО

№ опыта	Условия обработки			Скорость травления	Качество травления
	Состав травителя	Температура	Продолжительность		

### Контрольные вопросы

1. Сущность и особенности литографических технологий в современных производствах электронных устройств. 2. Определение, назначение, классификация, состав фоторезистов. 3. Особенности фотохимических процессов, протекающих в негативных и позитивных фоторезистах. 4. Сравнительная технологическая характеристика фоторезистов различных типов. 5. Основные этапы фотолитографии и структура подложек на каждом этапе. 6. Назначение и требования к операции травления в процессе фотолитографии. Требования, предъявляемые к травителям, и факторы их обуславливающие. 7. Технологические особенности травления ИТО в галогеноводородных кислотах.

### Литература

1. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Высшая школа, 1987. – с. 194 – 225. 2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., кн.1. – 1986. – с.354 – 373. 3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1991. – с. 336 – 419. 4. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – с. 100–130.

## Лабораторная работа № 5

### Изучение процессов травления в технологии полупроводниковых интегральных схем

Цель: знакомство с процессами травления полупроводников, диэлектриков и металлов, используемых в технологии кремниевых устройств, изучение влияния технологических параметров на скорость травления

#### Теоретические сведения

Под процессами травления в интегральной технологии полупроводниковых приборов и схем понимают виды обработки, которые включают химическое взаимодействие реагентов с функциональными и промежуточными материалами в процессе создания структуры прибора. Такими материалами являются монокристаллические кремниевые пластины, а также ряд пленок (аморфные диэлектрические  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , поликристаллический Si, металлические Al, Ti, V, Pt и др.). Лабораторная работа посвящена изучению процессов жидкостного травления. В современных технологиях широко используются также методы «сухого» травления с применением плазмы, ионных пучков и других активирующих физических воздействий.

Среди разновидностей травления в планарной интегральной технологии можно выделить *изотропное, анизотропное, локальное, селективное, послойное, полирующее*. Примерами операций, где используются эти виды травления являются процессы физико-химического анализа эпитаксиальных пленок и подложек, удаления механически нарушенного слоя, травления в фотолитографии, травление для выявления кристаллографических плоскостей, дефектов структуры, p-n-переходов, получения полупроводникового материала определенной толщины, контролируемого изменения поверхностных свойств (поверхностной проводимости и скорости поверхностной рекомбинации). В каждом конкретном случае к травителю предъявляются специфические требования.

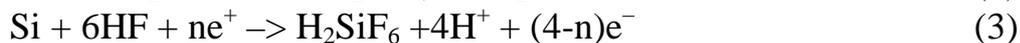
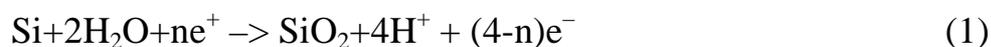
#### *Травление кремния*

Процесс растворения кремния при контакте с травителем без приложения электрического поля может протекать по двум механизмам: химическому и электрохимическому. При химическом механизме травления поверхностные атомы Si непосредственно взаимодействуют с компонентами раствора и окислительно-восстановительные реакции протекают в одном акте с образованием растворимых в травителе химических соединений кремния. При электрохимическом ме-

ханизме травления на поверхности кремния протекают две сопряженные реакции – анодная (окисление кремния) и катодная (восстановление окислителя). Пространственное разделение анодной и катодной реакций оказывается энергетически более выгодным, так как локализация этих реакций происходит там, где облегчается их протекание. Например, анодная реакция окисления протекает легче в областях, имеющих кристаллографические дефекты, скопление дислокаций и т. д. При травлении полупроводника основное отличие от травления металла состоит в том, что в обмене зарядами между полупроводником и раствором участвуют два типа носителей – электроны и дырки.

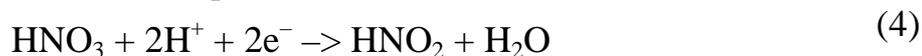
Анодный процесс травления связан с разрывом связей кристаллической решетки, а катодный – с выделением дырок, необходимых для протекания анодного процесса. Поэтому травление с анодным контролем на разных участках происходит с различной скоростью. Там, где имеются дислокации и другие нарушения кристаллической структуры, ослабляющие связи решетки, скорость травления больше, что применяют для выявления дислокаций на поверхности полупроводника (селективное или анизотропное травление). Для получения ровной зеркально-гладкой поверхности необходимо подобрать травитель с катодным контролем и подавить способность к селективному травлению. При травлении поток дырок, образующихся в катодной реакции восстановления окислителя с участием электронов валентной зоны, больше, чем их расход в реакции анодного растворения. В этих условиях от поверхности кремния в его объем текут ток избыточных дырок и равный ему ток свободных электронов. Эти неравновесные носители заряда рекомбинируют в квазинейтральной области на расстоянии порядка диффузной длины от поверхности.

Травление кремния в смеси **HF-HNO<sub>3</sub>** протекает по электрохимическому механизму. Анодную реакцию окисления кремния с образованием промежуточного поверхностного оксида и последующим его растворением плавиковой кислотой можно представить как



Дырки ( $\text{e}^+$ ), необходимые для протекания анодной реакции с разрывом ковалентной связи решетки кремния, генерируются сопряженной катодной реакцией восстановления  $\text{HNO}_3$ , имеющей автокаталитическую природу, т. е. продукты восстановления ускоряют весь

процесс в целом. Природа катализатора зависит от состава травителя и скорости травления. В концентрированных растворах  $\text{HNO}_3$  восстановление идет преимущественно до  $\text{HNO}_2$ . Основываясь на этом, катодную реакцию можно представить в виде



В основе автокаталитичности процесса восстановления лежит стадия (5), являющаяся замедленной химической реакцией регенерации  $\text{NO}_2$  – более сильного окислителя, чем  $\text{HNO}_3$ . Стадия (6) и есть электрохимическое восстановление окислителя с присоединением электронов валентной зоны и генерацией дырок, расходуемых в анодном окислении кремния по стадии (3). С учетом генерации дырок суммарный процесс травления кремния по электрохимическому механизму, используя стадии (3) и (4), можно представить в виде:



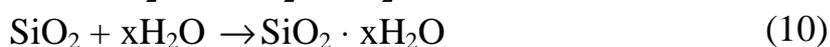
Скорость травления  $V_{\text{ТР}}$  кремния в травящей смеси на основе  $\text{HF-HNO}_3$  зависит от типа проводимости кремния. Максимальная скорость травления 26÷28 мкм/сек наблюдается при объемном соотношении  $\text{HNO}_3:\text{HF}=1:2,5$ . В смеси на основе  $\text{HF}$  и  $\text{HNO}_3$  в области пониженных концентраций  $\text{HF}$  максимальные величины скоростей травления достигаются через определенный индукционный период  $t_{\text{ин}}$ , который зависит от температуры, скорости перемешивания, условий и длительности хранения смеси. Оно зависит от концентрации  $\text{NO}_2$  в растворе и составляет от 2 до 30 секунд. В технологии изготовления полупроводниковых приборов часто используется кратковременное травление в течение 10÷30 секунд в смеси с избытком  $\text{HNO}_3$ . В этих случаях необходимо свести к минимуму  $t_{\text{ин}}$ , чтобы сократить время достижения максимальной скорости травления для данного состава травителя. В связи с этим, травление необходимо проводить при постоянной температуре и при достаточно интенсивном и контролируемом перемешивании. При этом травитель следует использовать спустя строго фиксированное время после его приготовления (не менее нескольких часов), в течение которого устанавливается стационарная концентрация ассоциатов  $[\text{HF}\cdot\text{HNO}_3]$  и продуктов восстановления  $\text{HNO}_3$  ( $\text{NO}_2$  и  $\text{HNO}_2$ ), образующихся при разложении  $\text{HNO}_3$  на

свету. Иногда для уменьшения индукционного периода травления кремния и создания в травителе требуемой концентрации  $\text{NO}_2$  используется травление в свежеприготовленном травителе определенного количества балластных пластин, а затем – рабочей партии.

Наиболее приемлемым для травления кремния в технологии изготовления интегральных микросхем является травитель состава  $\text{HF}(48\%) - \text{HNO}_3(67-70\%) - \text{CH}_3\text{COOH}$ (ледяная) с объемным соотношением 1 : 5 : 1. Уксусную кислоту вводят для ограничения скорости процесса травления на локальных участках благодаря частичному связыванию  $\text{HNO}_2$  и  $\text{HF}$  путем образования водородных связей.

Как было сказано выше, скорость травления в смеси  $\text{HF}-\text{HNO}_3$  зависит от типа проводимости. Это связано с тем, что в смеси  $\text{HF}-\text{HNO}_3$  устанавливаются различные электродные потенциалы  $\phi$  на p- и n-кремнии. На n-кремнии значения  $\phi$  более отрицательны, чем на p-кремнии, потенциал которого для низкоомных образцов практически не зависит от концентрации  $\text{HF}$  в широком интервале. При использовании системы  $\text{HF}-\text{HNO}_3-\text{CH}_3\text{COOH}$  для локального травления следует учитывать, что маской для данного травителя может быть только нитрид кремния, т.к. фоторезист не выдерживает воздействия травителя из-за высокого содержания  $\text{HNO}_3$ , а термический слой  $\text{SiO}_2$  имеет достаточно большую скорость травления в нем (150–200 нм/мин).

Травление кремния в **щелочах** происходит по химическому механизму и носит ярко выраженный анизотропный характер, т. е. скорость процесса зависит от кристаллографической ориентации полупроводника. Процесс травления кремния в щелочи включает реакции окисления кремния до  $\text{SiO}_2$  и восстановления воды до молекулярного водорода. Кроме этих основных реакций, имеются стадии гидратации  $\text{SiO}_2$  и химического взаимодействия гидратированного  $\text{SiO}_2$  со щелочью с образованием растворимых силикатов. Процесс проводят при повышенной температуре 50 – 100 °С.



Поскольку травление кремния в щелочи протекает в основном по химическому механизму, то его скорость не зависит от типа проводимости. Зависимость скорости травления кремния в  $\text{KOH}$  при температуре 100°С в зависимости от концентрации  $\text{KOH}$  интервале 0,1–20 моль/л проходит при  $T = 100^\circ\text{C}$  через четкий максимум, приходя-

щейся на концентрацию 1 моль/л. В области до максимума скорость травления линейно возрастает с увеличением концентрации. Дальнейшее увеличение концентрации КОН сопровождается снижением  $V_{\text{ТР}}$  по логарифмической зависимости. Рост скорости травления до максимума обусловлены увеличением степени гидратации диоксида кремния (стадия (10)), что в конечном счете способствует повышению растворимости  $\text{SiO}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$  (стадия (11)). Снижение скорости травления в более концентрированных растворах ( $C_{\text{КОН}} > 1$  моль/л) связано с уменьшением растворимости продуктов растворения кремния – силикатов, образующихся по реакции (11).

При травлении кремния в щелочи на поверхности образуется аморфная гидратированная оксидная пленка, что способствует загрязнению поверхности катионами щелочных металлов ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ). Это происходит в результате частичного захвата (окклюзии) продуктов растворения – силикатов калия или натрия благодаря их высокой концентрации в тонком слое раствора вблизи травящей поверхности. Поверхность кремния загрязняется так же путем обычной адсорбции примесей металлов, чему в значительной мере способствует отрицательная величина электродного потенциала в щелочи. Следует подчеркнуть, что обычная промывка кремниевых пластин деионизованной водой для очистки поверхности пластин после травления в щелочи малоэффективна из-за низкой растворимости продуктов окисления кремния в воде. На тщательно промытой поверхности кремния может адсорбироваться до  $10^{16}$  атомов/см<sup>2</sup> металлических примесей, причем адсорбция таких примесей из КОН и NaOH на 1÷2 порядка больше, чем из кислых растворов. Кроме того, преобладающая часть катионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$  концентрируется в зоне p-n перехода. Хемосорбированные и окклюдированные катионы и продукты растворения со связями типа кремний–кислород–калий (натрий) можно удалять с поверхности только специальными способами очистки. Другим существенным недостатком травления в щелочи является то, что этот процесс не позволяет получить гладкую поверхность кремния.

#### *Травление алюминия и его сплавов*

Алюминий и его сплавы (Al-Cu, Al-Cu-Si, Al-Si) практически всегда используют для формирования первого уровня металлизации интегральных микросхем. Эти пленки обладают удовлетворительной адгезией к диэлектрическим и полупроводниковым материалам и наносятся на рабочие пластины методом вакуумного напыления.

Травление алюминия обычно проводится локально (в процессе фотолитографии по металлизации) в щелочной или кислой среде. В технологии изготовления микросхем широко применяется травитель, состоящий из концентрированной азотной кислоты (3%), концентрированной ортофосфорной кислоты  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (76%), ледяной уксусной кислоты (15%) и воды (5%) по объему. Процесс травления в этом растворе проводится при температуре 30 – 40°C и состоит из двух стадий: формирования катиона алюминия  $\text{Al}^{3+}$  и образования  $\text{AlPO}_4$ .



Выделяющийся при травлении газ представляет смесь  $\text{H}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ . Адсорбция газов на поверхности  $\text{Al}$  является постоянной проблемой при использовании вязких травителей. Пузырьки способны замедлять травление: под ними образуются островки недотравленного металла, которые могут замыкать близкорасположенные проводники. Для снижения образования пузырьков при травлении  $\text{Al}$  применяются различные приемы: прерывание травления; ультразвуковое перемешивание; добавление поверхностно-активного вещества; вакуумирование кюветы травления. Для снижения бокового подтравливания  $\text{Al}$  разработано несколько травителей на основе  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$  с добавлением сахарозы и поверхностно-активных веществ.

При травлении алюминия в растворах на основе ферроцианидов (уравнение 13) пузырьки газа практически не выделяются. Состав этих травителей следующий: на 1 литр раствора более 5 г соли  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  или  $(\text{NH}_4)_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  для образования насыщенного раствора и 0,005–2 моль  $\text{KOH}$  или  $\text{NaOH}$  на каждый моль соли.



Некачественное травление алюминия обусловлено такими факторами, как недопроявленный фоторезист, плохая смачиваемость поверхности, подвергающейся травлению, неравномерность толщины пленки алюминия, напряжение в пленках поверх ступенек, гальваническое ускорение травления из-за наличия преципитатов  $\text{Al-Cu}$ , нестабильность температуры травителя (больше  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Эти факторы приводят либо к перетравливанию дорожек алюминия и увеличивают вероятность их обрыва, либо к закорачиванию шин металлической разводки. И то, и другое ведет к полному отказу в работе микросхем. В связи с этим при выполнении операций по травлению пленок алюминия обязательным условием является контроль за температурой в ванне травления, равномерностью травления пленки  $\text{Al}$  по пластине,

моментом окончания травления партии.

Точность поддержания температуры в ванне с травителем для пленок алюминия должна быть на уровне  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Для обеспечения такого разброса температуры часто используют интенсивное перемешивание травителя с помощью непрерывной циркуляции травителя или с помощью барботажа через объем травителя очищенного от примесей азота.

Равномерность травления пленок алюминия считается приемлемой если разница между временем полного травливания пленки алюминия и временем появления первого вытравленного участка на одной и той же пластине не превышает 10–15% от времени полного травливания. Для улучшения смачиваемости поверхности алюминия в состав травителя вводят поверхностно-активные вещества. Однако большинство используемых отечественных поверхностно-активных веществ взаимодействуют с кислотным травителем. Другой способ улучшения смачиваемости поверхности алюминия – это обработка пластин перед травлением в кислородной плазме, которая носит название плазмохимическое допроявление (ПХ-допроявление) пластин. ПХ-допроявление позволяет очистить вскрытые на операциях фотолитографии участки пластин от остатков фоторезиста, полимеров следов проявителя и т. д.

Точное определение времени окончания травления пленки Al является главным моментом в процессе травления Al, т.к. это позволяет обеспечить требуемые линейные размеры элементов металлической разводки, исключить обрывы и смыкания шин. В большинстве случаев травления Al прекращают после потемнения участков, не закрытых фоторезистом, и после прекращения газовой выделения.

#### *Травление $\text{SiO}_2$*

В технологии изготовления ИС широко применяются:

- а) пленки термического  $\text{SiO}_2$ , полученные окислением Si;
- б) пленки среднетемпературного диоксида (СТО), получаемые путем вакуумного пиролиза тетраэтоксисилана при  $T = 600\text{--}800^\circ\text{C}$ ;
- в) пленки плазмохимического диоксида (ПХО), получаемые из моносилана в процессе осаждения стимулированного плазмой при температуре порядка  $300^\circ\text{C}$ .

Травление диоксида кремния в технологии изготовления интегральных микросхем производится в травителях на основе фтористоводородной кислоты и описывается уравнением:



Травящей частицей в растворах HF является свободная кислота. Характеристики травления пленок SiO<sub>2</sub>, сформированных различными методами, очень сильно изменяются вследствие различий в структуре, стехиометрическом составе и физических свойствах (табл.1). Отжиг пленок SiO<sub>2</sub>, полученных методом осаждения из паро-газовой фазы, в атмосфере кислорода при температуре 800–850°C позволяет снизить скорость травления. Скорость травления пленок SiO<sub>2</sub> в растворе HF находится в прямой зависимости от концентрации фтористоводородной кислоты. С повышением температуры скорость травления также увеличивается.

Таблица 1

Скорость травления пленок SiO<sub>2</sub> полученных различными методами в травителе состава HF : H<sub>2</sub>O = 1 : 10.

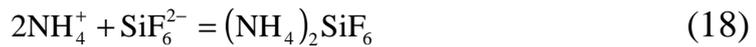
Тип пленки SiO <sub>2</sub>	Скорость травления, нм/мин
Термический SiO <sub>2</sub>	18 – 22
СТО	100 – 160
ПХО	70 – 80

Растворы фтористоводородной кислоты в технологии изготовления ИС чаще всего используются для процессов открытого травления пленок SiO<sub>2</sub>, потому что, из-за интенсивного газовыделения (SiF<sub>4</sub>-четырёхфтористый кремний – газообразный продукт), наблюдается частичное отслаивание фоторезиста и контуры вытравленных элементов имеют неровный край. Для трафаретного (локального) травления пленок SiO<sub>2</sub> растворы HF можно применять только в тех случаях, когда наряду с маской фоторезиста имеется дополнительная жесткая маска из нитрида кремния или поликристаллического кремния. Для подавления интенсивного газовыделения при травлении пленок диоксида кремния в растворах фтористоводородной кислоты добавляют фторид аммония NH<sub>4</sub>F, получая при этом так называемые буферные травители. Известно, что главной травящей частицей в буферных травителях является ионизованное фтористое соединение HF<sub>2</sub><sup>-</sup>, которое образуется следующим образом:



Химическая реакция растворения SiO<sub>2</sub> в буферном травителе описывается уравнениями:





Именно активные бифторид-ионы  $\text{HF}_2^-$  участвуют в процессе травления  $\text{SiO}_2$ . Этот факт подтверждается тем, что в чистом  $\text{NH}_4\text{F}$ , дающем при диссоциации только ионы  $\text{F}^-$ , травление  $\text{SiO}_2$  практически не происходит. Скорость травления  $\text{SiO}_2$  для  $\text{HF}_2^-$  в 4–5 раз выше, чем для  $\text{HF}$  (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные данные по скоростям травления  $\text{SiO}_2$  в растворе  $\text{HF}$  с добавлением и без добавления  $\text{NH}_4\text{F}$ .

Тип травителя	Содержание основных компонентов	Скорость травления, нм/мин
Травитель на основе $\text{HF}$	$C_{\text{HF}}=13$ г/л $C_{\text{NH}_4\text{F}}=0$ г/л	5,3
Буферный травитель	$C_{\text{HF}}=13$ г/л $C_{\text{NH}_4\text{F}}=78$ г/л	21

При заданном значении концентрации  $\text{HF}$ , концентрация  $\text{NH}_4\text{F}$  должна выбираться таким образом, чтобы обеспечить постоянство концентраций  $\text{HF}_2^-$  и  $\text{H}^+$ . Выбор концентрации  $\text{NH}_4\text{F}$  в буферном травителе определяется еще и снижением растворимости продукта реакции растворения  $\text{SiO}_2$ . С увеличением концентрации  $\text{NH}_4\text{F}$  растворимость гексафторсиликата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  падает, что может привести к загрязнению поверхности пластин продуктом химической реакции, выпавшим в осадок. Из-за высоких температур кристаллизации, что приводит к значительному повышению дефектности поверхности пластин, использование буферных травителей на основе  $\text{HF}$  и  $\text{NH}_4\text{F}$  в технологии изготовления ИС ограничено. Чаще всего их применяют для травления пленок  $\text{SiO}_2$  с маской фоторезиста, а также травления пленок борофосфосиликатного стекла (БФСС) и фосфосиликатного стекла (ФСС), т. к. из-за высоких скоростей травления таких пленок в растворах  $\text{HF}$  и интенсивного газовыделения наблюдается ухудшение равномерности травления. Варьируя концентрацию  $\text{HF}$  и  $\text{NH}_4\text{F}$  в буферных травителях, возможно добиться увеличения или уменьшения скорости травления  $\text{SiO}_2$ , а также повысить селективность процесса травления по отношению к пленкам БФСС и ФСС. Введя в состав буферного травителя этиленгликоль, глицерин или уксусную кислоту, можно выполнять операции травления пленок  $\text{SiO}_2$ , нанесенных на поверхность алюминия без значительных нарушений поверхности металла.

При выполнении трафаретного травления пленок  $\text{SiO}_2$  с маской фоторезиста необходимо учитывать, что степень адгезии фоторезиста к термическим пленкам оксида кремния достаточно велика. Однако адгезия фоторезиста ухудшается при жидкостном химическом травлении, если в буферный травитель попала азотная кислота или не соблюдено соотношение концентраций плавиковой кислоты и фтористого аммония в буферном травителе. Буферные травители обеспечивают высокое качество травления при молярном соотношении  $\text{NH}_4\text{F} : \text{HF}$  меньше 10. Значительно сложнее обстоит дело с обеспечением хорошей адгезии фоторезиста к пленкам ФСС и БФСС. Это связано с тем, что поверхность ФСС и БФСС интенсивно адсорбирует влагу. Гигроскопичность этих пленок может быть обусловлена большим количеством разорванных силоксановых групп  $\text{Si-O}$ , наличием на поверхности пленок оксида фосфора в виде  $\text{P}_2\text{O}_5$ , а также микрошероховатостью и рыхлостью поверхности. В связи с этим, перед нанесением фоторезиста пластины с ФСС или БФСС обрабатывают в горячей смеси Каро для удаления несвязанного фосфора, а затем отжигают в атмосфере азота для получения на пленке ФСС или БФСС "корочки" оксида кремния, к которому адгезия фоторезиста хорошая.

#### **Выполнение работы**

*Оборудование:* фторопластовая и стеклянная посуда для химической обработки и промывки образцов; пинцет; термометр; электрическая плитка; сушильный шкаф; аналитические весы.

*Материалы:* образцы окисленных и неокисленных кремниевых пластин; алюминия; дисциллированная вода; толуол (этанол);  $\text{HNO}_3$ ;  $\text{HF}$ ;  $\text{NaOH}$ ;  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ;  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; фильтровальная бумага.

В работе проводятся эксперименты по изучению кинетики травления различных материалов ( $\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}$ ) по следующим этапам.

1. Подготовка образцов для травления (природа материалов (кремний, диоксид кремния, алюминий) указывается преподавателем), которая включает обезжиривание, промывку, сушку. В случае необходимости производится приготовление растворов травителей.

2. Получение индивидуального задания, которое включает природу травителей, температуру и продолжительность травления.

3. Взвешивание образцов на аналитических весах, измерение их геометрических размеров с помощью штангенциркуля для расчета площади поверхности образцов.

4. Проведение опытов в соответствии с заданием, которые включают травление при заданных условиях, последующую промыв-

ку в непроточной и проточной воде, сушку и взвешивание. Травление  $\text{SiO}_2$  контролируется методом цветовых оттенков Ньютона (приложение 2). В ходе экспериментов фиксируются сопутствующие эффекты (изменение окраски образцов, раствора, газовыделение и другие).

5. Составление уравнений реакций, расчет скорости травления для каждого опыта и сопоставление с литературными сведениями. Результаты экспериментов представляются в виде таблицы 3 и графиков (по согласованию с преподавателем).

Таблица 3

№ опыта	Природа и размеры образца	Условия травления	Масса образца, г		Наблюдаемые эффекты	Скорость травления, мкм/мин
			до травления	после травления		
1.						

### Контрольные вопросы

1. Назначение и виды травления в интегральной технологии полупроводниковых приборов. 2. Механизмы травления. 3. Состав травителей. 4. Особенности травления различных материалов ( $\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}$ ) в интегральной технологии. 5. Влияние технологических параметров на скорость и качество травления различных материалов.

### Литература

1. Сангвал К. Травление кристаллов. – М.: Мир, 1990. – с. 404 – 428. 2. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – с. 43 – 71. 3. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., кн.1. – 1986. – с.55 – 58. 4. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники – В 10-и кн., кн.4. – 1989. – с.45 – 63.

### Лабораторная работа № 6

#### **Изучение технологического маршрута изготовления полупроводниковых интегральных схем на биполярных структурах (ТТЛШ-элементах)**

Цель работы: изучение типового маршрута и технологических параметров операций изготовления ТТЛШ-элементов биполярных интегральных схем.

#### **Теоретические сведения**

Среди достоинств полупроводниковых приборов и ин-

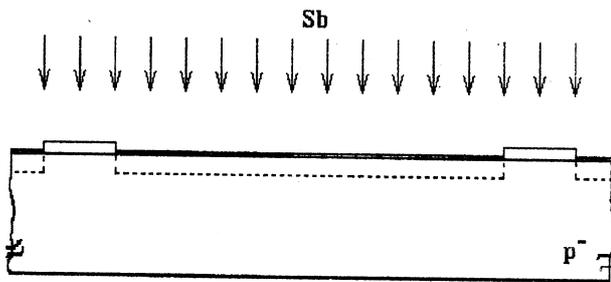


Рис. 1. Формирование  $n^+$ -скрытого слоя

применение таких структур в запоминающих устройствах и логических схемах вычислительной техники. Среди разновидностей биполярных микросхем достаточно распространенной на практике является транзистор-транзисторная логика с диодами Шотки (ТТЛШ).

ТТЛШ-элемент включает чаще всего  $n$ - $p$ - $n$ -транзистор с диодом Шотки. В качестве исходного материала используется подложка, слаболегированная (порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) акцепторной примесью (например, КДБ-10). После окисления подложки (маскирующий  $\text{SiO}_2$ ) проводят фотолитографию для создания **скрытого  $n^+$ -слоя** (рис. 1). Для уменьшения сопротивления коллекторной области транзистора поверхностное сопротивление скрытых слоев необходимо уменьшать, насколько это возможно. С этой целью скрытые слои подвергаются сильному легированию. Такой сильнолегированный скрытый слой приводит к чрезмерной диффузии примеси в слаболегированный эпитаксиальный коллектор  $n$ -типа и может стать причиной образования дефектов в эпитаксиальном слое. При выборе примеси для легирования скрытого слоя обычно отдают предпочтение мышьяку или сурьме, а не фосфору, поскольку они имеют более низкий коэффициент диффузии. Скрытый слой получают путем ионной имплантации сурьмы с последующим термическим отжигом в окислительной атмосфере. Защищенные и незащищенные участки поверхности окисляются с разной скоростью. В результате происходит заглупление  $n^+$ -скрытого слоя по периметру по сравнению с остальной поверхно-

тегральных схем, выполненных на биполярных структурах, можно отметить высокое быстродействие, повышенную крутизну ВАХ и гибкие возможности управления устройством. Это обуславливает широкое

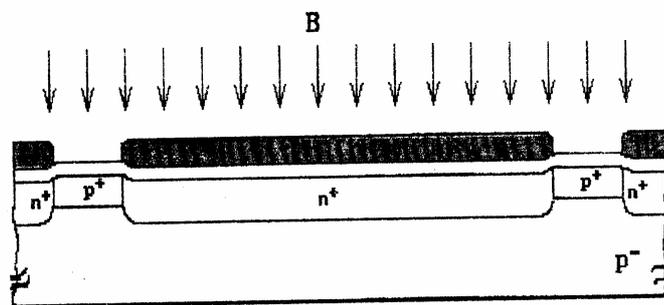


Рис. 2. Формирование  $p^+$ -скрытого слоя

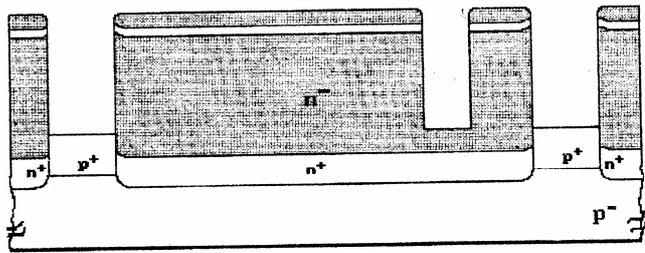


Рис. 3. Эпитаксия и травление кремния под локальное окисление

эпителиальный слой (рис. 3). Эпитаксиальный слой проводимостью n-типа служит в качестве коллекторной области. Чем слабее легирован эпитаксиальный слой и чем больше его толщина, тем меньшей емкостью обладает переход коллектор - база полупроводникового прибора. Эта емкость является основной паразитной емкостью, ограничивающей быстродействие биполярных транзисторов. Однако слишком низкий уровень легирования эпитаксиального слоя очень сложно проконтролировать в ходе эпитаксиального выращивания из-за процесса автолегирования примесью из скрытого слоя. Уровень легирования эпитаксиальных слоев составляет  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

После создания скрытых слоев и эпитаксиального слоя переходят к процессам получения **изоляции**. Для этого на подложку с эпитаксиальным слоем последовательно наносят маскирующие слои  $\text{SiO}_2$  (около 50 нм) и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (около 100 нм). Первый тонкий промежуточный слой  $\text{SiO}_2$  выполняет роль буфера упругих напряжений, возникающих при последующих высокотемпературных процессах окисления и инициирующих дефектообразование в кремниевой подложке. Второй более толстый слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  предотвращает нижележащий кремний от окисления. Далее проводят фотолитографию для локального окисления. Изолирующий оксид выращивается таким образом, чтобы его верхняя поверхность

и поверхность кремния лежали в одной плоскости. С этой целью проводят травление кремния под локальный оксид (рис. 3). Высокотемпературное термическое окисление осуществляют на глубину 1,6

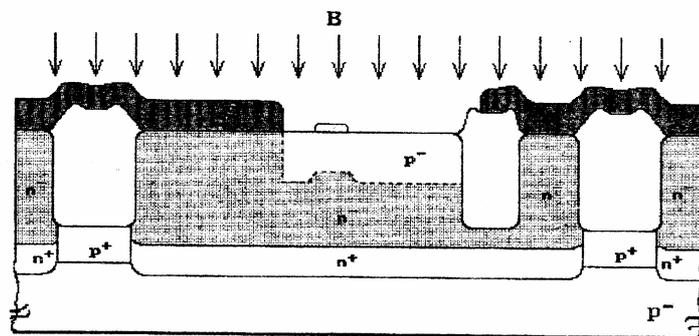


Рис. 4. Формирование области базы

стью пластины. Затем проводят процессы для создания **скрытого p+ слоя** (рис. 2). Этот слой выполняет функцию изоляции (границы) между карманами.

Далее выращивают

мкм. Изоляция оксидом требует меньших затрат площади кристалла и сопровождается меньшими паразитными емкостями по сравнению с изоляцией р-п-переходом. Скрытый р<sup>+</sup>-слой позволяет сократить толщину термического изолирующего оксида, а также уменьшить микрорельеф поверхности. Одновременно скрытый р<sup>+</sup>-слой исключает инверсионные (за счет самодиффузии доноров из n<sup>+</sup>-скрытого слоя) каналы между карманами под локальным оксидом, что повышает электрическую прочность изоляции. Возможно формирование р<sup>+</sup>-скрытого слоя на данном этапе после локального травления SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и примерно половины (по глубине) эпитаксиального кремния.

После создания изоляции, включающего высокотемпературные длительные термообработки, которые приводят к самодиффузии из n<sup>+</sup>-скрытого слоя, переходят к процессам создания активных областей транзистора. **Базовая область** создается в две стадии путем ионного легирования бором (рис. 4) с использованием двух фотолитографий, в ходе которых формируется активная и внешняя область базы. Двухстадийное формирование базы обеспечивает большую гибкость управления свойствами этой важной области. Отметим здесь, что снижение заряда в базе позволяет повышать коэффициент усиления по току (обычная плотность заряда составляет 10<sup>12</sup>-10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>). Высоколегированная (порядка 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>) **эмиттерная область** обеспечивает высокий коэффициент усиления по току и небольшое сопротивление эмиттера. Она может быть получена одновременно с n<sup>+</sup>-коллектором (рис. 5) с помощью ионного легирования фосфором с последующим отжигом (разгон примеси в инертной атмосфере).

На заключительном этапе технологического маршрута проводятся процессы создания **металлизации и диода Шотки**. В качестве металла для получения диода Шотки, формируемого на коллекторно-базовых областях, используют силицид платины. Диод Шотки создается при контакте силицида платины одновременно с эпитаксиальным слоем n-типа и областью базы р-типа (точнее охраной базы р<sup>+</sup>-типа). Металлизация диода

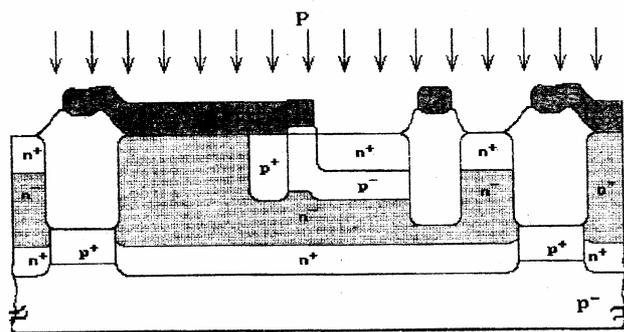


Рис. 5. Формирование областей эмиттера и коллектора

Шотки подбирается таким образом, чтобы обеспечить высокий потенциальный барьер на контакте с полупроводником n-типа (коллектор) и низкий (то есть фактически просто омический контакт) – с материалом p-типа (база).

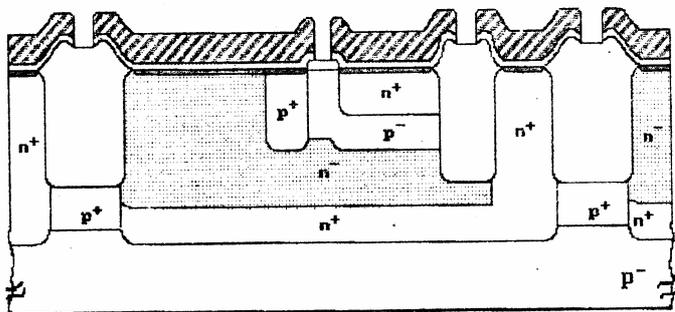


Рис. 6. Формирование металлизации и диода Шоттки

Диод Шоттки шунтирует коллектор и предохраняет прямое смещение перехода коллектор - база, то есть переход транзистора в режим насыщения. Охранный p<sup>+</sup>-слой базы по периметру диода Шоттки увеличивает напряжение обратного пробоя диода, т.к. уменьшает напряженность поля на резких углах диода. Одновременно слой PtSi выполняет функции контактирующего слоя многослойной металлизации для высоколегированных областей эмиттера и коллектора. После напыления и вжигания платины, проводятся процессы металлизации, которая состоит из двух слоев: TiN - барьерного и Al - проводящего. Заключительным процессом получения микросхемы является пассивация, которая проводится с помощью низкотемпературных слоев SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

### Выполнение работы

Работа выполняется с использованием компьютерной обучающей программы. Работа включает следующие этапы:

1. Запуск программы осуществляется из папки **C: \ Интегральная технология** запускаящим файлом **Op\_sbis.exe**. Далее выбирается вариант работы **ТТЛШ** из меню программы.

2. Изучение маршрутной технологии включает знакомство с последовательностью операций и этапов формирования структуры ТТЛШ-элементов полупроводниковых интегральных схем.

3. По результатам изучения технологии представляется:

–изображение финишной структуры ТТЛШ-элемента с указанием *названия, назначения и состава* всех областей структуры;

–маршрутный лист технологии формирования ТТЛШ-элемента с разбиением маршрута на основные блоки (например, «n<sup>+</sup>-скрытый слой», «изоляция» и т.д.) и с указанием основных техноло-

гических параметров для отдельных операций (при необходимости используются литературные сведения о режимах операций).

4. По заданию проводится заполнение данных в таблицах 1-3.

Таблица 1

Данные по режимам локального легирования

№ операции	Природа и доза примеси, мкКл/см <sup>2</sup>	Формируемая область	Концентрация примеси, см <sup>-3</sup>	
			вводимая	эффективная
1.				

Таблица 2

Данные по режимам окисления

№ операции	Характеристика оксида		Технологические параметры		
	назначение	толщина, мкм	температура, °С	среда	продолжительность, мин
1.					

Таблица 3

Данные по режимам фотолитографии

№ операции	Характеристика слоя			Параметры травления		
	назначение	толщина, мкм	размер окна, мкм	вид (жидкое или сухое)	травитель (среда)	продолжительность, мин
1.						

**Контрольные вопросы**

1. Общая характеристика использования элементов на биполярных структурах в производстве интегральных схем. 2. Основные области ТТЛШ-элементов, их назначение и химический состав. 3. Общая характеристика технологии получения биполярных структур в сравнении с МОП-структурами. 4. Маршрутная технология формирования ТТЛШ-элементов и технологические параметры операций.

**Литература**

1. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Высшая школа, 1987. – с. 341 – 366. 2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., кн.2. – 1986. – с.185 – 205. 3. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем,

микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – с. 205 – 231.

#### Лабораторная работа № 7

### **Изучение технологического маршрута изготовления полупроводниковых интегральных схем на МОП-структурах (КМОП-элементах)**

Цель работы: изучение последовательности формирования структуры и технологических параметров операций типового маршрута изготовления КМОП-элементов интегральных схем.

#### **Теоретические сведения**

Полевой транзистор на основе структуры металл-оксид (диэлектрик)-полупроводник был получен через несколько лет после диффузионного биполярного транзистора. В настоящее время МОП-структуры наиболее широко применяются в производстве интегральных схем в виде КМОП-элементов, которые вобрали в себя все преимущества и достижения полупроводниковой планарной технологии. Среди достоинств КМОП-элементов отметим широкий диапазон напряжений питания и высокую выходную мощность. Для цифровых схем важным преимуществом этих структур является повышенная помехоустойчивость за счет широкого диапазона возможных значений выходного напряжения. Общим технологическим достоинством МОП-структур является меньшее число операций (в том числе дорогостоящих литографий) и следовательно более низкая стоимость.

Разработка и внедрение КМОП-элементов позволило решить наиболее острую проблему МОП-структур – высокую потребляемую мощность. Небольшое потребление мощности в КМОП-структурах обусловлено тем, что в любом логическом состоянии транзисторы закрыты. В современных интегральных схемах обычно используются структуры с большим числом быстродействующих n-канальных транзисторов, и гораздо меньшим числом p-канальных приборов, то есть реализуются динамические схемы, в которых не все МОП-транзисторы являются парными, как в статических схемах. Это позволяет экономить площадь кристалла (по сравнению с парными КМОП-структурами) и уменьшать потребляемую энергию (в сравнении со схемами на одноступенчатых n-канальных МОП-структурах). Дополнительные возможности по регулированию параметров схемы дает использование в одном кармане более надежных транзисторов со встроенным каналом и более дешевых транзисторов с индуцирован-

ным каналом.

В лабораторной работе рассматривается технологический маршрут изготовления базового матричного кристалла (БМК) на КМОП-элементе на основе пары  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов с индуцированным каналом. Существуют  $n$ - и  $p$ -однокарманный, а также двухкарманный вариант создания КМОП-структур. В последнем случае  $n$ - и  $p$ -канальные транзисторы формируются в  $p$ - и  $n$ -карманах подложки соответственно. Введение двух самосовмещенных карманов необходимо, во-первых, для повышения устойчивости микросхем к основной проблеме КМОП-элементов – эффекту защелкивания (или тиристорному эффекту). Он возникает при протекании значительных устойчивых токов в тиристорной структуре на базе паразитных  $n$ - $p$ - $n$  и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторов (например, в структуре исток-карман-подложка). Такое защелкивание в виде нежелательного канала проводимости может привести к нарушению функционирования схемы или даже к ее разрушению. Во-вторых, независимый уровень легирования в отдельных карманах позволяет гибко регулировать параметры отдельных приборов (например, пороговое напряжение). В качестве материала подложки «двухкарманного» варианта можно использовать кремний обоих типов проводимости. При формировании структуры непосредственно в кремниевой пластине (без эпитаксии) используются слаболегированные подложки ( $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). В таком варианте сложнее управлять параметрами транзисторных структур. При использовании эпитаксиальных слоев подложкой обычно является достаточно сильно легированный кремний  $n$ -типа ( $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Эпитаксиальный слой того же типа в таком случае обычно является более *высокоомным*, чем подложка, что уменьшает вероятность защелкивания транзисторной структуры. В работе в качестве примера рассматривается кремниевая подложка КЭФ-4,5.

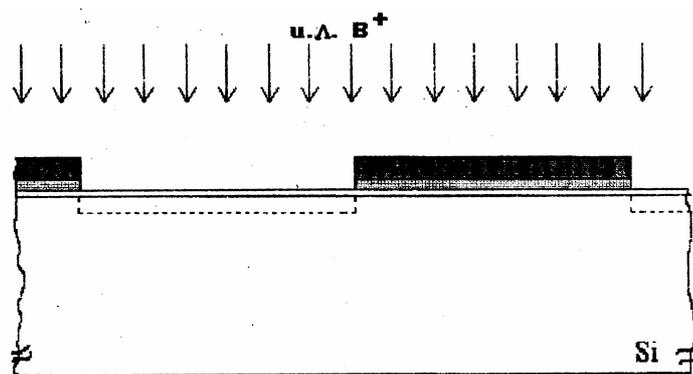


Рис. 1. Формирование областей  $p$ -кармана (аналогично для  $n$ -кармана)

начинается с формирования карманов (рис. 1), что осуществляется в отдельных циклах локального легирования подложки. Маскирующее покрытие в этом случае включает двуслойный диэлектрик на основе  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . **Карман p-типа** (более протяженная область для ряда n-канальных транзисторов) формируется ионным легированием бора с энергией 40 кэВ и дозой  $2,0 \text{ мкКл/см}^2$  через тонкий слой оксида. **Карман n-типа** (обычно менее протяженная область для немногочисленных p-канальных транзисторов) формируется ионным легированием фосфора с энергией 75 кэВ и дозой  $0,5 \text{ мкКл/см}^2$ . (рис.2). Разгонка карманов происходит при  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 часов в атмосфере кислорода и 8 часов в атмосфере аргона, после чего оксид полностью удаляется с поверхности кремния. Напомним здесь, что каждый карман может включать большое число однотипных транзисторов, не требующих создания специальной изоляции. Как уже указывалось, число n-канальных транзисторов обычно больше, поэтому размеры p-карманов превышают размеры n-карманов.

Следующим этапом технологии является формирование **охраны** и **изоляции** между карманами (рис. 2). Эти области минимизируют отрицательное влияние паразитных транзисторов, возникающих между исток-стоковыми областями одного кармана и подзатворным полупроводником другого кармана. **Охранные зоны** между карманами представляют собой достаточно глубокие  $p^+$ -области, расположенные на границе карманов. Они ограничивают распространение инверсных каналов в транзисторных структурах, которое может привести к возникновению электрической связи между приборами. Доза легирования охранных (ограничительных) областей выбирается достаточно высокой, чтобы обеспечить необходимую концентрацию бора после локального окисления. Вместе с тем, слишком сильное

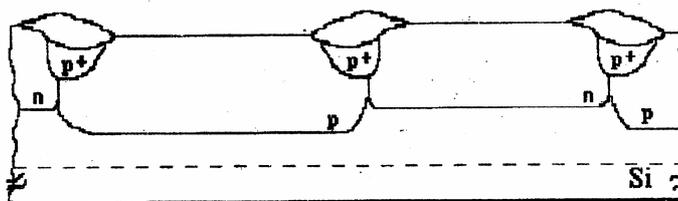


Рис. 2. Формирование охранных областей и изоляции между карманами

легирование (дозой более  $10^{13} \text{ ат/см}^2$ ) приводит к увеличению емкости сток(исток)/подложка, к снижению напряжения пробоя охранных p-n-переходов и увеличению чувствительности порогового напряжения к эффектам сужения ширины канала. Для создания глубоких охранных  $p^+$ -областей используется ионное легирование бора с повышенной

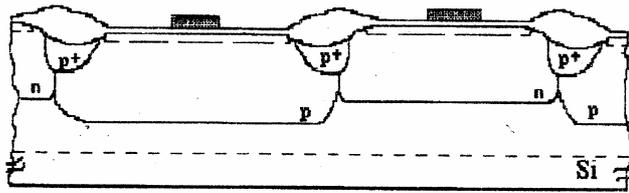


Рис. 3. Подлегирирование областей индуцированного канала и формирование подзатворного диэлектрика и затвора на основе поликристаллического кремния

изоляция). Этот способ позволяет обеспечить пониженную рельефность поверхности пластины, поскольку в этом случае значительная часть изолирующего оксида расположена не на поверхности, а в глубине пластины. Локальный оксид для LOKOS-изоляции (до 1,0 мкм) выращивается при повышенном давлении с использованием маски из нитрида кремния. В отличие от биполярных структур на данном этапе при формировании КМОП-элементов не требуется локальное окисление на всю глубину эпитаксиального слоя (рис. 2). Отметим, что увеличение толщины локального оксида более нескольких сотен нм увеличивает размеры дефекта, называемого «птичий клюв», который снижает плоскостность поверхности пластины. Слишком тонкий изолирующий оксид приводит к низким пороговым напряжениям паразитного транзистора и увеличению емкости поликремний/подложка. Недостатком локальной изоляции, при которой в качестве маски используется  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , является возможность повреждения подложки под нитридом аммиаком, выделяющимся в процессе высокотемпературного локального окисления. На поврежденных участках впоследствии не осаждаются подзатворный оксид, что приводит к низковольтному пробую транзистора.

Следующий блок технологического маршрута обычно называют формированием затвора (рис. 3). Однако этот этап на самом деле включает создание трех основных областей МОП-структуры: **затвора** (поликремний), **подзатворного диэлектрика** ( $\text{SiO}_2$ ) и **канала** (легированный Si). В случае транзисторов с индуцированным каналом канальная (подзатворная) область полупроводника легируется с целью регулирования величины, точнее, достижения заданного (достаточно низкого) значения порогового напряжения. Для этого (особенно при тенденции уменьшения длины канала и толщины подзатворного ди-

энергией порядка 100 кэВ и дозой 250 мкКл/см<sup>2</sup> (рис. 2).

Простой вариант **изоляции** предполагает выращивание толстого слоя  $\text{SiO}_2$  на всей поверхности пластины. Более эффективным является метод локального окисления (LOKOS-

электрика) необходимо обеспечить достаточно высокую концентрацию примесей в подложке под каналом. Напомним, что структура КМОП-элементов формируется в слаболегированном полупроводнике. В случае КМОП-структуры стоит задача выравнивания пороговых напряжений транзисторов разных типов, то есть снижения одного и увеличения другого. С этой целью проводится подлегирование областей обоих каналов бором либо в одном, либо в отдельных (как в предложенном варианте) циклах. В случае транзисторов со встроенным каналом область канала формируется в виде полупроводника с типом проводимости, противоположным подложке (карману). Отметим, что маршруты и режимы легирования (подлегирование подложки, кармана, канала) на этом этапе могут отличаться в зависимости от особенностей создаваемой структуры.

Очень важным этапом является формирование тонкого (десятки нм) слоя **подзатворного оксида**. Сплошность и степень чистоты этого слоя во многом определяют работоспособность приборов. Предложенный технологический маршрут рассчитан для проектных норм на топологию 2 мкм, в связи с чем толщина подзатворного диэлектрика в примере выбрана 0,027 мкм. Эффективная длина канала для n-канального транзистора составляет 1,1 мкм, а p-канального - 1,4 мкм. В качестве подзатворного диэлектрика используется пирогенный оксид кремния, который наиболее отвечает необходимым требованиям.

**Затвор** в предложенном маршруте формируется на основе поликремния (0,45 мкм), диффузионнолегированного фосфором с использованием силанового метода. Использование поликремния связано с его повышенной термостойкостью по сравнению с металлами. Улучшенными характеристиками обладают затворы, содержащие силициды тугоплавких металлов на поверхности поликремния. При выборе материала затвора следует учитывать работу выхода электронов,

которая влияет на величину порогового напряжения транзистора.

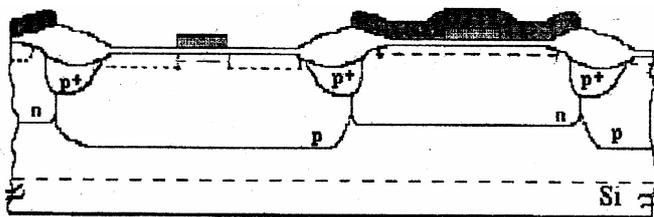


Рис. 4. Формирование стоков – истоковых областей

**Истоки (стоки)** (рис. 4) транзисторных структур создаются в виде вырожденных высоколегированных областей с типом проводимости,

соответствующим каналу. **Истоки (стоки)**  $n^+$  создаются ионным

легированием фосфора с энергией 40 кэВ и дозой 1000 мкКл/см<sup>2</sup>. Истоки (стоки)  $p^+$  создаются ионным легированием бора с энергией 30 кэВ и дозой 300 мкКл/см<sup>2</sup>. Затем проводится активация (разгонка) примеси при 850°С в сухом кислороде в течении 30 минут.

Так как концентрация примеси в  $p$ -кармане достаточно низкая, пороговое напряжение  $n$ -канальных транзисторов зависит в основном от дозы ионов бора, имплантированных в канал. Пороговое напряжение  $p$ -канального транзистора определяется в основном уровнем легирования в области канала. Величины пороговых напряжений  $p$ - и  $n$ -канальных транзисторов составляют  $1,1 \pm 0,2$  В. Удельные поверхностные сопротивления основных слоев (табл.1) контролируются на соответствующих этапах на спутниках (нерабочих пластинах, которые проходят аналогичную обработку).

Таблица 1

Параметры основных слоев и областей структуры КМОП-элемента

№ п/п	Назначение слоя	Природа слоя	Толщина, мкм	Поверхностное сопротивление, Ом/□
1.	Первый слой металлизации	Al + 1%Si	0,6-0,8	0,1
2.	Второй слой металлизации	Al + 1%Si	1-1,1	0,1
3.	Затвор	ПолиSi	0,45	30
4.	Исток (сток) $n^+$	Si + P	0,5	60
5.	Исток (сток) $p^+$	Si + B	0,5	10
6.	$p$ -карман	Si + B	~ 6	2500
7.	$n$ -карман	Si + P	~ 5	4000

В конструкции микросхем используется двухуровневая **металлизация** (рис. 5) с шагом в слоях - 6 мкм (шина - 4,2 мкм; зазор - 1,8 мкм). Столь малые топологические размеры требуют максимальной **планаризации** рельефа. В качестве первого межслойного планаризирующего диэлектрика используется борофосфорно-силикатное стекло (БФСС) толщиной 0,6мкм. Достоинством БФСС является его низкая температура оплавления (850 °С), что позволяет проводить планаризацию как по затвору, так и после травления контактных окон. При травлении происходит "подтрав" кремния в области контактных окон (на глубину 0,1 мкм), что приводит к снижению поверхностной кон-

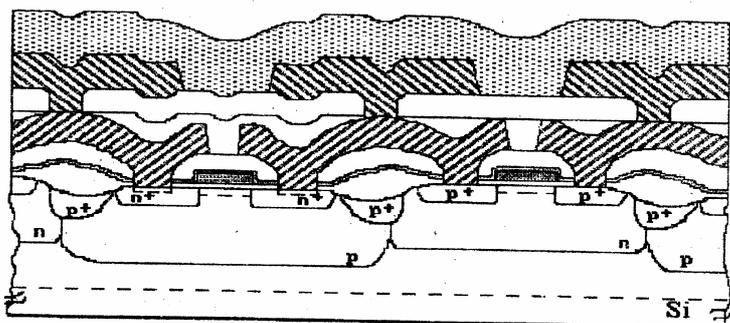


Рис. 5. Формирование двухуровневой однослойной металлизации с предварительной и промежуточной планаризацией поверхности и последующей пассивацией финишной структуры

центрации носителей в  $n$ -области и, как следствие, к увеличению контактного сопротивления. С целью исключения данного вида брака необходимо проводить дополнительное легирование  $n$ -области с использованием дополнительной литографии.

С целью исключения обрывов по второму слою металла проводится дополнительная планаризация методом сквозного протравливания. Метод заключается в следующем: после создания первого уровня металлизации наносится фосфорно-силикатное стекло (ФСС) (0,8 мкм) и разжиженный фоторезист. После сушки и задубливания фоторезиста проводится плазмохимическое травление фоторезиста и ФСС, причем режимы травления подбираются таким образом, чтобы скорость травления фоторезиста и ФСС были одинаковыми. Наилучшая планаризация получается, когда травление проводится до остаточной толщины ФСС 0,3 мкм. После формирования металлизации проводят **пассивацию** (рис. 5) кристаллов для защиты структур от механических и климатических воздействий. В качестве пассивирующих слоев МОП- и КМОП-структур используется нитрид кремния, осажденный плазмохимически, или смешанный аналогично полученный слой  $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ , в котором слой нитрида имеет большую толщину.

### Выполнение работы

Работа выполняется с использованием компьютерной обучающей программы. Работа включает следующие этапы:

1. Запуск программы осуществляется из папки **C: \ Интегральная технология** запускаящим файлом **Op\_sbis.exe**. Далее выбирается вариант работы **КМОП** из меню программы.

2. Изучение маршрутной технологии формирования структуры КМОП-элементов полупроводниковых интегральных схем.

3. По результатам изучения технологии представляется изображение финишной структуры КМОП-элемента и маршрутный лист технологии формирования КМОП-элемента (аналогично работе № 6).

4. По заданию проводится заполнение данных в таблицах 1-3, форма которых приведена в лабораторной работе № 6.

### Контрольные вопросы

1. Общая характеристика использования элементов на МОП-структурах в производстве интегральных схем. 2. Основные области КМОП-элементов, их назначение и химический состав. 3. Общая характеристика технологии получения МОП-структур в сравнении с биполярными схемами. 4. Маршрутная технология формирования КМОП-элементов и технологические параметры операций.

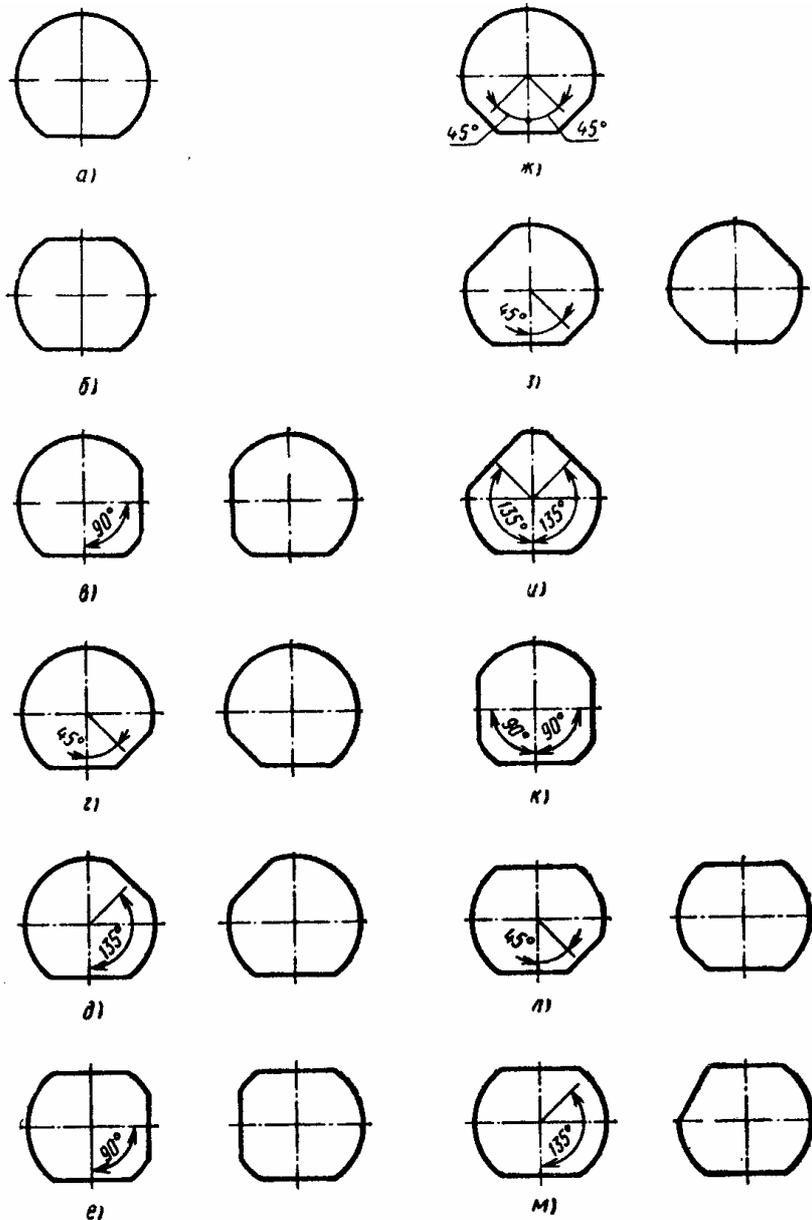
### Литература

1. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Высшая школа, 1987. – с. 377 – 384, 396 – 399. 2. Технология СБИС / Под ред. Зи С. – В 2-х кн., кн.2. – 1986. – с.231 – 247. 3. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – с. 232 – 251.

### Оглавление

Введение . . . . .	3
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Изучение операций контроля полупроводниковых пластин и структур в технологиях микроэлектроники . . . . .	3
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Изучение операций контроля и видов брака процесса формирования эпитаксиальных пленок кремния .	16
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Изучение влияния состава рабочей среды на процессы термического окисления кремния . . . . .	25
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Изучение завершающих операций технологического цикла фотолитографии . . . . .	36
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Изучение процессов травления в технологии полупроводниковых интегральных схем . . . . .	45
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Изучение технологического маршрута изготовления полупроводниковых интегральных схем на биполярных структурах (ТТЛШ-элементах) . . . . .	55
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Изучение технологического маршрута изготовления полупроводниковых интегральных схем на МОП-структурах (КМОП-элементах) . . . . .	61

Расположение дополнительных срезов на пластинах кремния различных марок



а) КДБ - 10 (111); б) КЭФ - 4,5 (100); в) КЭФ - 4,5 (111); г) КДН - 10 (100);  
 д) КЭФ - 7,5 (111); е) КЭФ - 1 (111); ж) КЭФ - 0,5 (111); з) КЭФ - 0,2 (111);  
 и) КЭФ - 2 (111); к) КЭС - 0,01 (111); л) и м) кремний n- и p-типа соответственно, не вошедший ни в одну группу марок

### Определение толщины пленки $\text{SiO}_2$ методом цветowych оттенков Ньютона

Этот простой метод основан на наблюдении интерференционных цветов в отраженном свете, которые обусловлены двойным отражением и преломлением белого света, проходящего через прозрачную пленку и отражающегося от непрозрачной подложки. При этом за счет разности хода лучей возникает интерференция, и поэтому тонкие прозрачные пленки кажутся в отраженном свете окрашенными. Цветность их зависит только от толщины и показателя преломления:

$$\Delta = 2nd \sin \alpha,$$

где  $\Delta$  — разность хода лучей;

$n$  — показатель преломления пленки;

$\alpha$  — угол отражения;

$d$  — толщина пленки.

Если наблюдение отраженного света производить под прямым углом к поверхности пленки, то  $\Delta = 2nd$ . Отсюда, зная показатель преломления материала, легко определить толщину на основании цвета пленки. Для  $\text{SiO}_2$   $d = \Delta/3$ , так как  $n = 1,5$ .

Зависимость толщины пленки от наблюдаемого цвета (при перпендикулярном освещении образца) приведена в табл. 4. Цветовые оттенки в табл. 1 повторяются примерно через каждые 0,22 мкм, проходя весь спектр от фиолетового к красному краю. Поэтому для однозначного определения толщины необходимо знать порядок интерференции, т. е. какое по счету повторение цветов наблюдается. Для определения порядка интерференции на окисленную пластину осторожно наносят каплю плавиковой кислоты. При этом в оксиде вытравливается лунка до поверхности кремния. После промывки по периферии этой лунки наблюдается ряд колец. Количество темных красно-фиолетовых колец и определяет порядок интерференции. Например, зеленый цвет оксида на четвертом кольце (полностью выявлены три кольца) соответствует толщине 0,72 мкм, а на втором кольце (полностью выявлено одно кольцо) — толщине 0,33 мкм. Этот метод позволяет определить толщину оксида с погрешностью 5—10%. С увеличением толщины пленки погрешность возрастает.

### Зависимость цвета оксидной пленки на кремнии от ее толщины

Толщина SiO <sub>2</sub> , мкм	Порядок отражения	Оттенок	Толщина SiO <sub>2</sub> , мкм	Порядок отражения	Оттенок
0,050		бежевый	0,480		голубовато-фиолетовый
0,070		коричневый	0,490		голубой
0,102		индиго	0,500		зелено-голубой
0,120		голубой	0,520		зеленый
0,150		светло-голубой	0,540		тускло-зеленый
0,170	<b>I</b>	металлический	0,553	<b>III</b>	желто-зеленый
0,184		желто-зеленый	0,561		зелено-желтый
0,188		светло-зеленый	0,570		желто-серый
0,192		зелено-желтый	0,580		светло-оранжевый
0,200		светло-золотистый	0,600		темно-розовый
0,220		золотистый	0,630		фиолетово-красный
0,222		оранжевый	0,642		серовато-красный
0,249		светло-красный	0,669		голубовато-серый
0,250		красный	0,680		голубоватый
0,270		красно-фиолетовый	0,683		голубовато-зеленый
0,281		пурпурно-фиолетовый	0,720		зеленый
0,289		фиолетовый	0,770	<b>IV</b>	желтоватый
0,300		фиолетово-голубой	0,779		бледно-розовый
0,310		голубой	0,800		оранжевый
0,316		темно-голубой	0,820		желтовато-розовый
0,320	<b>II</b>	зелено-голубой	0,850		красновато-фиолетовый
0,340		светло-зеленый			фиолетовый
0,350		зеленый			голубовато-фиолетовый
0,376		желтовато-зеленый	0,860	<b>V</b>	голубой
0,383		грязно-зеленый	0,870		голубовато-зеленый
0,390		желтый	0,890		желто-зеленый
0,410		светло-оранжевый	0,920		желтый
0,419		телесный	0,950		
0,420		темно-розовый	0,970		
0,440		красный			
0,448		фиолетово-красный			
0,459		фиолетовый			
0,460		красно-фиолетовый			

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Составитель **Богомазова** Наталья Валентиновна

Редактор К.В. Мишина

Подписано в печать                      Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л.                      Уч.-изд.  
Тираж 40 экз. Заказ

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». 220050. Минск, Свердлова, 13а.  
ЛИ №02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет». 220050. Минск, Свердлова, 13.  
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.