

Вакуумная техника, совокупность методов и аппаратуры для получения, поддержания и контроля вакуума.

История развития физики и химии, а также ряда отраслей промышленности неразрывно связана с развитием В. т. Герон из Александрии (вероятно, 1 в.) описывает приспособления (*рис. 1 и 2*), которые можно считать прототипами пневматических механизмов, использованных позднее для создания разрежения. Первые опыты с вакуумом относятся к 40-м гг. 16 в. В 1654 немецкий учёный О. фон Герики поставил опыт с Магдебургскими полушариями, наглядно показав существование атмосферного давления. Насос, которым он пользовался, был первым насосом для получения вакуума (*рис. 3*).

Изготовление ламп накаливания (1879) вызвало дальнейшее развитие В. т. Значительный вклад в В. т. внёс немецкий учёный В. Гедде. В 1905 он впервые применил вращательный ртутный насос, в 1913 создал первый молекулярный насос (*рис. 4*), в 1915 опубликовал отчёт о диффузионном насосе (*рис. 5*). В 1916 американский учёный Ленгмюр создал конденсационный парортутный насос (*рис. 6*).

Быстрое развитие В. т. связано с развитием электроники, ядерной энергетики, ускорительной техники. Современные достижения в области вакуумной дистилляции, широкое распространение вакуумно-металлургических и вакуумно-химических процессов, работы в области управляемых термоядерных реакций, техника получения тонких плёнок, особо чистых материалов для космических летательных аппаратов и испытания этих аппаратов в условиях, близких к космическим, стали возможны только благодаря высокому уровню развития современной В. т. В июне 1958 в Бельгии состоялся первый Международный конгресс по В. т., решением которого было создание Международного общества по вакуумной физике и вакуумной технике.

Вакуумная система, или вакуумная установка, представляет собой ёмкость, соединённую с вакуумными насосами, и включает в себя вакуумметры, вакуумную арматуру, течеискатели и др. устройства. Выбор типа вакуумного насоса для поддержания вакуума при обеспечении заданного процесса определяется рабочим диапазоном давлений насоса и его предельным давлением; быстротой откачки насоса в заданном диапазоне (*рис. 7*). Порядок получения высокого вакуума следующий: механическими форвакуумными насосами от атмосферного давления до 10^{-1} н/м² (10^{-3} мм рт. ст.); диффузионными насосами до 10^{-5} н/м² (10^{-7} мм рт. ст.); ионно-сорбционными насосами до 10^{-9} н/м² (10^{-11} мм рт. ст.). Достижение давлений порядка 10^{-6} — 10^{-7} н/м² (10^{-8} — 10^{-9} мм рт. ст.) и меньше невозможно без предварительного удаления газа со стенок откачиваемого объёма.

При последовательном соединении насосов количество газа $Q = p_1 s_1 = p_2 s_2 = \dots p_i s_i$, где p_i — впускное давление; s_i — быстрота откачки. При этом насосы выбирают таким образом, чтобы впускное давление в каждом последующем было заведомо меньше и не достигало допустимого впускного давления предыдущего. Полнота использования насосов в вакуумной системе определяется быстротой откачки насоса s_n и сопротивлением канала, соединяющего насос с откачиваемым элементом вакуумной системы. Эффективная быстрота откачки

$$s_{\text{эф}} = \frac{s_n}{s_n + R},$$

где

$$u = \frac{1}{\alpha}$$

— пропускная способность вакуумпровода, величина, обратная сопротивлению (измеряется в единицах быстроты откачки, л/сек). Следовательно, всегда $S_{эф} < S_H$; $S_{эф} < u$. Существует следующая зависимость между количеством газа, протекающим через вакуумпровод $Q = p_i S_i$, пропускной способностью вакуумпровода u и разностью давлений на его концах: $Q = u (p_2 - p_1)$. Значение u в общем случае определяется природой газа, его состоянием, геометрией вакуумпровода и режимом течения газа.

В установках, в которых требуемая быстрота откачки столь значительна, что не может быть обеспечена насосами, установленными вне откачиваемого объёма, используют поглощающие свойства распылённого металла, например титана, аналогично тому, как это имеет место в ионно-сорбционных насосах. Внутри откачиваемого объёма устанавливают один или несколько испарителей, с помощью которых на внутренних стенках камеры осаждается титан. Для удаления газа, не поглощаемого титаном, к откачиваемому объёму присоединяют диффузионный насос.

Одной из задач В. т. является измерение малых давлений до 10^{-12} н/м² (10^{-14} мм рт. ст.) и ниже и достижение герметичности вакуумной системы, в особенности в местах соединения отдельных её элементов. Измерение столь малых давлений требует специальной аппаратуры (см. *Вакуумметрия*). Обнаружение течей осуществляется специальными течеискателями.

В. т. широко применяют как в промышленности, так и в лабораторной практике. Например, массовое производство различных электровакуумных приборов неразрывно связано с совершенствованием получения высокого вакуума и возможностью его поддержания. Изготовление этих приборов требует удаления газов (обезгаживания) и использования [геттеров](#) для сохранения вакуума. Вакуумную обработку таких приборов производят на многопозиционных карусельных откачных автоматах. Приборы проходят позиции: установку, откачку, прогрев и обезгаживание с целью удаления с внутренних поверхностей адсорбированных газов, распыление геттерирующих веществ, отпайку и съём. Очистку и разделение высокомолекулярных кремнийорганических соединений, продуктов полимеризации, масляных фракций нефти, сложных эфиров, спирта, концентратов витаминов и др. продуктов производят в вакууме 10^{-1} н/м² (10^{-3} мм рт. ст.). В вакууме ведут обезгаживание и пропитывают изоляционные материалы, заливают конденсаторы и трансформаторы, пропитывают кабели, сушат вещества (например, пластмассы), которые при атмосферном давлении не высушиваются. В вакууме также сушат при комнатной и повышенной температурах и в замороженном состоянии методом сублимации термочувствительных веществ (яичный белок, ферменты, женское молоко, антибиотики, культуры бактерий, вакцины и т.д.). Вакуумными насосами удаляют растворители из веществ, не допускающих нагревания (например, взрывчатые вещества), и повышают концентрацию растворов.

Вакуум нашёл применение при термическом или катодном распылении металла для нанесения покрытий и металлизации различных материалов, например в производстве оптических и бытовых зеркал, ёлочных игрушек, отражателей автомобильных и самолётных фар, украшений из металлов и пластмасс. В вакууме производят обработку тканей при крашении, металлизацию бумаги, керамики, матриц граммофонных пластинок и полупроводниковых материалов, нанесение защитных и декоративных плёнок в рабочем диапазоне давлений 10^{-2} — 10^{-4} н/м² (10^{-4} — 10^{-6} мм рт. ст.).

В металлургии в вакууме восстанавливают металлы из руд и их химических соединений, производят плавку, рафинирование и дегазацию металлов (см. [Вакуумная плавка](#), [Дегазация стали](#)). Процессы плавки, испарения и перегонки металлов в вакууме лежат в основе получения материалов высокой чистоты. Для этого в металлургии применяют высокопроизводительные многопластинчатые парожекторные насосы и бустерные (пароструйные и механические) с рабочим давлением до 10^{-2} н/м² (10^{-4} мм рт. ст.).

Средства В. т. в современной экспериментальной физике обеспечивают работы электрофизических приборов и установок, в которых осуществляется движение пучков заряженных частиц. Только в сверхвысоком вакууме возможны исследования физических свойств поверхностей твёрдых тел, а также некоторые исследования, требующие получения газов высокой чистоты.

В установках с откачиваемыми объёмами в сотни м³ осуществляют непрерывную откачку множеством (до нескольких десятков) параллельно работающих высокопроизводительных насосов с быстротой откачки от сотен до десятков м³/сек. Наряду с диффузионными насосами широко применяются ионно-сорбционные, обладающие большой быстротой откачки и остаточным давлением ниже 10^{-8} н/м² (10^{-10} мм. рт. ст.).

Решение многих сложных проблем наука и техники требует достижения давлений 10^{-14} н/м² (10^{-16} мм рт. ст.) и ниже, а также измерения таких давлений. Для этого необходимы совершенные измерительные приборы, высокочувствительные методы проверки герметичности и создание достаточных уплотнений в аппаратуре для сверхвысокого вакуума, подготовка и очистка поверхностей откачиваемых объёмов, которая исключает выделение этими поверхностями загрязняющих газов.

Лит.: Вакуумное оборудование и вакуумная техника, под ред. А. Гутри и Р. Уокерлинг, пер. с англ., М., 1951; Яккель Р., Получение и измерение вакуума, пер. с нем., М., 1952; Ланис В. А., Левина Л. Е., Техника вакуумных испытаний, 2 изд., М. — Л., 1963; Дэшман С., Научные основы вакуумной техники, пер. с англ., М., 1964; Королёв Б. И., Основы вакуумной техники, 5 изд., М. — Л., 1964; Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А., Оборудование для откачки вакуумных приборов, М. — Л., 1965.

И. С. Рабинович.



Рис. 6. Первый конденсационный парортутный насос Ленгмюра: 1 — колба с ртутью; 2 — изолирующая рубашка; 3 — трубка для отвода паров ртути; 4 — канал для отвода сконденсировавшихся паров; 5 — ловушка; 6 — трубка для подсоединения насоса к откачиваемому объёму.

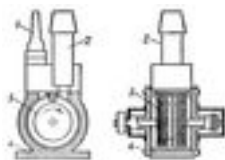


Рис. 4. Молекулярный насос Геде: 1 — выпускной патрубок; 2 — впускной патрубок; 3 — ротор; 4 — корпус.



Рис. 5. Первый диффузионный насос: 1 — испаритель; 2 — паропровод; 3, 5 — вход и выход проточной воды; 4 — диффузионная щель; 6 — термометр; 7 — выпускная трубка; 8 — ртутный затвор; 9 — патрубок первой откачки; 10 — впускная трубка.



Рис. 1 (слева). Шприц Герона. Рис. 2 (справа). Колба Герона для создания разрежения.

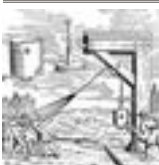


Рис. 3. Насос, примененный Герике в опыте с Магдебургскими полушариями. Гравюра 17 в.



Рис. 7. Области действия различных вакуумных насосов (в н/м^2): 1 — водокольцевых; 2 — поршневых; 3 — паромасляных бустерных; 4 — механических бустерных; 5 — диффузионных; 6 — ионно-сорбционных.

Виды вакуумных покрытий

- Однослойные вакуумные покрытия:
 1. зеркала
 2. простая тонировка
 3. цветная тонировка
- Многослойные вакуумные покрытия:
 1. зеркала селективные
 2. теплоотражающее покрытие – Е-стекло
 3. солнцезащитное покрытие
 4. цветное теплоотражающее покрытие
- Специальные вакуумные покрытия
- На что еще можно наносить вакуумные покрытия
- Реакционное распыление

Виды вакуумных покрытий

Сразу нужно оговориться, что мы будем рассматривать только те вакуумные покрытия, которые наносятся на стекла большого размера в промышленном производстве.

Покрытия могут быть однослойными на основе любых металлов и сплавов и многослойными. К однослойным можно условно отнести и вакуумные покрытия, которые состоят из слоев металла и соединений этого металла (например, титан + оксид титана). Многослойные вакуумные покрытия требуют наличия нескольких мишеней из разных материалов. Слои могут быть на основе чистых металлов и сплавов или на основе соединений металлов, которые образуются при добавлении реакционно-способного газа (как правило, кислорода, азота или их смеси). Таким образом, изменяя материал мишени и состав рабочего газа, можно получать практически любые слои в любой последовательности.

I. Однослойные вакуумные покрытия.

1. *Зеркала* – это полированное стекло марки М1, на которое нанесен слой металла или сплава толщиной 0,10-0,12 мкм. В отличие от термических установок, это может быть не только алюминий, но и любой другой металл или сплав со своим неповторимым оттенком. Слой металла закрывается защитным слоем краски или лака. Если Вы хотите узнать какую краску лучше применять – свяжитесь с отделом маркетинга.

2. *Зеркала для шкафов-купе* (травмобезопасные) – то же зеркало, но слой металла закрывается пленкой самоклеящейся, а поскольку клей у самоклеящейся местами агрессивный, то лучше слой металла закрыть сначала слоем титана. Цикл удлиняется на 10-15 мин., но какой эффект!

3. *Зеркала прямого вида* – это зеркало, в котором отражающий слой нанесен с видимой стороны изделия. Например, отражатели фар, фурнитура, декоративные решетки, светильники и т.д. В этом случае отражающий слой защищается прозрачным лаком. Хотя иногда требуется действительно зеркало прямого вида на плоском стекле, которое нельзя закрывать лаком. Тогда приходится в качестве отражающего слоя использовать хром. Красиво, нет двойного отражения, но чуть подороже.

4. *Тонировка* – это нанесение полупрозрачного слоя металла на стекло. Поскольку этот слой нельзя чем-то защитить, то применяются коррозионностойкие металлы, чаще всего титан.

5. *Цветная тонировка* – та же тонировка, но добавляется слой оксида или оксинитрида титана. Сам по себе слой прозрачный, а цвет достигается за счет интерференции света, который отражается от металлической пленки и от прозрачной пленки. Вроде пленки масла на воде, которая дает радужку, потому что толщина пленки везде разная.

6. *Прозрачная цветная тонировка* отличается тем, что интерференция света происходит при отражении от поверхности прозрачной пленки оксида титана и поверхности стекла. При этом, если стекло на отражение золотистое, то на просвет сиреневое и наоборот. Чтобы эффект был заметным, покрытие оксида титана должно быть потолще и равно половине длины волны того цвета, который отражается.

II. Многослойные вакуумные покрытия.

1. *Зеркала селективные* – то же зеркало, но между стеклом и отражающим слоем (металлом) есть еще 1-2 слоя, которые являются просветляющими по какой-либо длине волны (причем не обязательно видимого спектра). Характерный пример – это противоослепляющие зеркала заднего вида автомобилей или зеркала с цветным оттенком.

2. *Теплоотражающие вакуумные покрытия* - Е-стекло. Это стекло с так называемым «мягким покрытием». Самая стандартная система вакуумные покрытия включает в себя три слоя. Первый слой - прозрачный из оксида титана или нитрида алюминия. Второй слой – это серебро. Третий слой - защитный, по составу такой же как и первый. Кажется все достаточно просто, но важно соблюсти все пропорции по толщине слоев и их структуре.

Строго говоря, любое покрытие (включая и само стекло) является теплоотражающим. Любой металл более интенсивно отражает или поглощает инфракрасное излучение, чем видимый свет. Главное заключается в том, какой процент инфракрасного излучения отражается при определенном пропускании видимого спектра (надо учитывать интегральное значение по всей длине спектра, а не максимум пропускания по какой-то длине волны). Коэффициент отражения металла в инфракрасном спектре тем выше, чем выше его электропроводность. Это согласно теории, а на практике, с учетом всех практических и экономических факторов, весь цивилизованный мир остановился на серебре.

Если есть стекло с «мягким покрытием», то, наверное, должно быть и с «жестким». Правильно, такое стекло существует, но теплоотражающие свойства у него ниже, и есть свои нюансы при изготовлении стеклопакетов. Такое стекло получают методом пиролиза, как правило, на стекольном заводе.

3. *Солнцезащитные покрытия* – похоже на теплоотражающее, но максимум пропускания в видимом спектре смещен к синему цвету, и отражение по всему спектру выше.

4. *Цветные теплоотражающие покрытия* отличается тем, что первый слой у него толще, и является не только адгезионным, но и интерферирующим, т.е. отражает в видимом диапазоне какую-то длину волны. По сути, это гибрид цветной тонировки и теплоотражающего покрытия.

III. Специальные вакуумные покрытия:

1. Зеркала одностороннего видения.
2. Фото и электрохромные стекла.
3. Прогреваемые стекла.
4. Другие специальные покрытия.

Специальные покрытия, как правило, не производятся в больших объемах, поэтому мы не будем подробно их рассматривать. Хотя, если оборудование предназначено для нанесения, например, теплоотражающих покрытий, то при незначительных доработках может наносить и специальные покрытия.

На что еще можно наносить вакуумные покрытия

Покрытия можно наносить, как обычно пишут, «на твердые подложки», т.е. практически на все, правда, не всегда это экономически оправдано. Наносить можно любые металлы, сплавы или соединения металлов, например, оксиды, нитриды, карбиды и т.д., или, например, оксинитриды, можно наносить многослойные покрытия. Начнем с самого простого и «ходового».

1. Нанесение защитно-декоративных покрытий с использованием лаковой технологии.

На изделие из любого материала наносят слой лака, который служит адгезивным и глянцевающим слоем. Марка лака подбирается исходя из материала изделия. Далее на вакуумной напылительной установке наносится металлический отражающий слой и снова слой лака, уже прозрачного. Это стандартный и широко распространенный в мире процесс. Для таких целей мы выпускаем установку «BATT 1600M». Для крупногабаритных изделий можно использовать «BATT 1600-2M» или сделать специальную установку. Сейчас довольно актуален вопрос о нанесении покрытий на алюминиевый профиль вместо анодирования или полимерной окраски. Такой

процесс вполне окупаем. При необходимости, помимо технологического процесса металлизации, мы организуем и участок нанесения лака со всеми технологическими тонкостями.

2. Нанесение защитно-декоративных (в том числе антикоррозионных) покрытий на металлические подложки.

В этом случае изделие нужно нагреть до определенной температуры, чтобы получить хорошую адгезию и структуру покрытия, произвести ионную обработку и т. д. В зависимости от материала, габаритов изделия и требуемого покрытия технологический процесс, как и состав установки, может сильно изменяться. В качестве базовой принимается установка «BATT 1600M» (или аналог меньших размеров), которая дооснащается в соответствии с требованиями технического задания. В качестве покрытия могут применяться нитриды, оксиды, карбиды, сульфиды и т.д.

3. Металлизация пленочных материалов.

Раньше применялась для получения конденсаторной бумаги, сейчас снова возрождается, но уже для металлизации упаковочной пленки. Если это пленка-самоклейка, то можно делать дешевые «шильдiki» или наклейки.

За двадцать, без малого, лет работы приходилось заниматься и разными интересными вещами, например:

1. Нанесение титана большой толщины на «трубы» для последующей диффузионной сварки.
2. Нанесение меди на алюминиевые призмы. Потом эти призмы спаиваются в кубик, и алюминий травится в щелочи. Получается красивая сотовая структура.
3. Нанесение меди на остеклованный терморезистор. Такой датчик (не только терморезистор) можно запаять в какой-то узел и измерять быстро и точно параметр процесса. При испытаниях разрыв происходит по разрушению стекла, а не по покрытию.
4. Нанесение меди на различные пластмассы для последующего электромонтажа.
5. Прозрачные покрытия на основе оксида титана приходилось напылять на флаконы, в которые заливают духи. Получается очень красиво – один флакон на отражение золотистый, а на просвет сиреневый, а другой наоборот.
6. Зеркало прямого вида на основе хрома для всяких хитрых вещей.
7. Латунирование стальной арматуры для резинометаллических изделий. Гораздо дешевле гальваники, и при этом прилипание резины лучше.
8. Хромовое покрытие на прессформы, полученное методом магнетронного напыления намного превосходит гальваническое хромовое покрытие и, самое главное, предотвращает залипание формованного изделия в форме.
9. Нанесение резистивных слоев на стекло, эмалированные поверхности, керамику.
10. Нанесение переходных технологических слоев для последующей пайки, сварки, склеивания.

И многое, многое другое. Разумеется, мы не сможем бесплатно покрывать все образцы. По некоторым вопросам придется выполнять НИР. Но если такой вопрос возникнет, то мы можем подключить лучших специалистов Казани и многих коллег на просторах СНГ.

На многие покрытия можно сделать примерный экономический расчет. Нужно только указать все требования к покрытию, материал и форму подложки, объем выпуска.

Реакционное распыление

Реакционное распыление – это распыление с добавлением реакционного газа, например, кислорода. Процесс довольно хитрый и неустойчивый. В самом простом варианте кислорода дают

с избытком. Мишень покрывается слоем оксидов и распыляется, правда очень медленно. Металл летит на стекло и окисляется там или по дороге. Если кислорода дать меньше определенного количества, то скорость распыления (при той же мощности) будет большая, весь кислород будет поглощаться распыленным металлом, и покрытие получится металлическим с примесью оксидов. Если поток кислорода установить в какое-то среднее «идеальное» состояние, то все равно, в силу различных факторов мишень стремится или к окисленному состоянию, или к чистому. Поэтому поток кислорода нужно поддерживать пропорциональным скорости распыления. Делается это или изменением мощности, или изменением потока кислорода. Если изделие и магнетрон неподвижны или перемещаются друг относительно друга большое число раз, то можно использовать первый способ. В реальных условиях для получения однородности покрытия по длине изделия мощность лучше держать постоянной, а состояние мишени поддерживать изменением потока кислорода. Важно, чтобы система управления была устойчива к воздействию случайных возмущений. Здесь существенным становится такой показатель вакуумной системы как «динамика вакуума», т.е. отношение быстроты откачки к объему вакуумной камеры. Именно поэтому надо усиливать откачку для случаев реакционного распыления.

Полупроводниковая электроника, отрасль [электроники](#), занимающаяся исследованием электронных процессов в полупроводниках и их использованием — главным образом в целях преобразования и передачи информации. Именно с успехами П. э. связаны, в основном, высокие темпы развития электроники в 50—70-х гг. 20 в. и её проникновение в автоматику, связь, вычислительную технику, системы управления, астрономию, физику, медицину, в исследования космич. пространства, в быт и т.д.

Краткая историческая справка. Основные вехи развития П. э. — открытие [фотоэффекта](#) в селене (У. Смит, США, 1873), открытие односторонней проводимости контакта металла с полупроводником (К. Ф. [Браун](#), 1874), использование кристаллических полупроводников, например галенита (PbS), в качестве [детекторов](#) для демодуляции радиотелеграфных и радиотелефонных сигналов (1900—05), создание меднозакисных (купроксных) и селеновых [выпрямителей тока](#) и [фотоэлементов](#) (1920—26), использование кристаллических детекторов для усиления и генерирования колебаний (О. В. [Лосев](#), 1922), изобретение транзистора (У. [Шокли](#), У. [Браттейн](#), Дж. [Бардин](#), 1948), создание [планарной технологии](#) (1959), появление [интегральной электроники](#) и переход к микроминиатюризации электронного оборудования (1959—61). Большой вклад в создание П. э. внесли советские учёные — физики и инженеры (А. Ф. [Иоффе](#), Н. П. [Сажин](#), Я. И. [Френкель](#), Б. М. [Вул](#), В. М. [Тучкевич](#), Г. Б. Абдулаев, Ж. И. Алферов, К. А. Валиев, Ю. П. Докучаев, Л. В. [Келдыш](#), С. Г. Калашников, В. Г. Колесников, А. В. Красилов, В. Е. Лашкарёв, Я. А. Федотов и многие др.).

Физические основы П. э. Развитие П. э. стало возможным благодаря фундаментальным научным достижениям в области [квантовой механики](#), физики [твёрдого тела](#) и физики [полупроводников](#).

В основе работы полупроводниковых (ПП) электронных приборов и устройств лежат следующие важнейшие свойства полупроводников и электронные процессы в них: одновременное существование [носителей заряда](#) двух знаков (отрицательных — электронов проводимости и положительных — дырок); сильная зависимость величины и типа электропроводности от концентрации и типа примесных атомов; высокая чувствительность к воздействию света и тепла, чувствительность к действию магнитного поля и механических напряжений; эффект односторонней проводимости при протекании тока через запирающий слой [электронно-дырочного перехода](#) (p — n -перехода) или Шотки барьера, нелинейность вольтамперных характеристик таких слоев, введение (инжекция) неосновных носителей, нелинейная ёмкость p — n -перехода; туннельный переход носителей сквозь потенциальный барьер (см. [Туннельный эффект](#)); лавинное размножение носителей в сильных электрических полях; переход носителей из одного минимума энергетической зоны в другой с изменением их [эффективной массы](#) и подвижности и др.

Один из эффектов, наиболее широко используемых в П. э., — возникновение p — n -перехода на границе областей полупроводника с различными типами проводимости (электронной — в n -области, дырочной — в p -области); его основные свойства — сильная зависимость тока от полярности напряжения, приложенного к переходу (ток в одном направлении может в 10^6 раз и более превышать ток в др. направлении), и способность к инжекции дырок в n -область (или электронов в p -область) при включении напряжения в направлении пропускания тока через p — n -переход. Свойства, близкие к свойствам p — n -перехода, имеет барьер Шотки, обладающий вентильными свойствами (односторонней проводимостью), но не обладающий способностью к инжекции. И p — n -переход, и барьер Шотки обладают электрической ёмкостью, изменяющейся по нелинейному закону с изменением напряжения. При превышении внешним обратным напряжением определённой величины в них развиваются явления пробоя. Сочетание двух p — n -переходов, расположенных близко в одном кристалле полупроводника, даёт транзисторный эффект: эффект управления током запертого перехода с помощью тока отпертого перехода. Три p — n -перехода в одном кристалле, разделяющие четыре области попеременно электронной и дырочной проводимости, образуют [тиристор](#). Решающее значение для П. э. имеет транзисторный эффект: именно на его основе работают ПП приборы основного типа — [транзисторы](#), которые определили коренные изменения в радиоэлектронной аппаратуре и ЭВМ и обеспечили широкое применение систем автоматического управления в технике.

К физическим явлениям, которые в начале 70-х гг. 20 в. стали использовать в П. э., относится и [акустоэлектрический эффект](#) в диэлектрических и ПП материалах. На основе этого эффекта оказалось возможным создавать усилители электрических колебаний, активные электрические фильтры, линии задержки с усилением сигнала, что привело к появлению нового направления П. э. — акустоэлектроники.

Одна из наиболее общих черт развития П. э. — тенденция к интеграции самых различных физических эффектов в одном кристалле. П. э. начинает смыкаться с электроникой диэлектрических материалов (см. [Диэлектрическая электроника](#)), магнитных материалов и т.д., превращаясь постепенно в электронику твёрдого тела в самом широком смысле этого слова.

ПП технология. Главные технологические задачи П. э. — получение [полупроводниковых материалов](#) (в основном монокристаллических) с требуемыми свойствами, реализация сложных ПП структур (прежде всего p — n -переходов) и разработка методов изготовления [полупроводниковых приборов](#), в которых ПП слои сочетаются с диэлектрическими и металлическими. Образование p — n -переходов сводится к введению в полупроводник необходимого количества нужных примесей в строго определённых областях. В настоящее время (1975) распространены 3 способа получения p — n -переходов: сплавление, [диффузия](#) и [ионное внедрение](#) (имплантация).

При сплавлении на поверхность пластины из полупроводника, обладающего одним типом проводимости (например, на n -Ge, богатый [донорами](#)), помещают кусочек металла, проникновение атомов которого в полупроводник способно придавать ему проводимость др. типа (например, кусочек In, атомы которого служат в Ge [акцепторами](#)), и нагревают пластину. Т. к. температура плавления In значительно ниже температуры плавления Ge, то In расплавляется, когда Ge ещё остаётся в твёрдом, кристаллическом состоянии. Ge растворяется в капельке расплавленного In до насыщения. При последующем охлаждении растворённый Ge начинает выделяться из расплава и кристаллизоваться вновь, восстанавливая растворившуюся часть кристалла. В процессе кристаллизации атомы Ge захватывают с собой атомы In. Образовавшийся слой Ge оказывается обогащённым In и

приобретает проводимость дырочного типа. Т. о., на границе этого слоя и нерастворившейся части кристалла Ge образуется p — n -переход.

При диффузии, например, из газовой фазы пластина полупроводника, обладающего, скажем, электронной проводимостью, помещается в пары вещества, придающего полупроводнику дырочный характер проводимости и находящегося при температуре на 10—30% ниже температуры плавления полупроводника. Атомы вещества-диффузанта, совершая хаотическое тепловое движение, бомбардируют открытую поверхность полупроводника и проникают в глубь его объёма. Максимальная концентрация их создаётся в приповерхностном слое. Этот слой приобретает дырочную проводимость. По мере удаления от поверхности концентрация акцепторов падает и в некотором сечении становится равной концентрации доноров. Это сечение будет соответствовать положению p — n -перехода. В слоях, расположенных более глубоко, преобладают доноры, и полупроводник остаётся электронным. Распространены также и др. методы диффузии: диффузия из тонких слоев диффузанта, нанесённых непосредственно на поверхность полупроводника, из стекловидных слоев, содержащих диффузанта, в потоке инертного газа, смешанного с парами диффузанта, и т.д. В качестве диффузанта могут использоваться не только чистые доноры или акцепторы, но и их соединения. Метод диффузии — основной метод получения p — n -переходов.

Ионное внедрение является одним из способов получения p — n -переходов, дополняющим и частично заменяющим диффузию (*рис. 1*).

Исключительно важную роль в развитии П. э. сыграло появление и быстрое распространение планарной технологии. Большое значение планарной технологии определяется тем, что она обеспечила: широкий переход к групповому методу изготовления ПП приборов (одновременно на одной ПП пластине изготавливается несколько тысяч приборов); существенное повышение точности и воспроизводимости конфигурации элементов приборов и связанное с этим повышение воспроизводимости электрических параметров; резкое уменьшение размеров элементов и зазоров между ними — до микронных и субмикронных — и создание на этой основе СВЧ усилительных и генераторных транзисторов (*рис. 2*); реализацию т. н. полевых приборов, в том числе полевых транзисторов; возможность создания на одном ПП кристалле законченного электронного устройства — ПП интегральной схемы, включающей в себя необходимое число отдельных ПП приборов (диодов, транзисторов и др.), резисторов, конденсаторов и соединений между ними. Главное достоинство планарной технологии в том, что именно она сделала возможным интенсивное развитие интегральной микроэлектроники, привела к исчезновению грани между изготовлением деталей и элементов электронной техники и изготовлением радиоэлектронной аппаратуры. Последовательные процессы изготовления ПП материалов, затем — ПП приборов и, наконец, устройств, ранее значительно разнесённые во времени и разобщённые в пространстве, оказались совмещёнными в одном технологическом цикле.

Особенности ПП производства. Большая сложность изделий П. э., их весьма высокая чувствительность к микроскопическим дозам загрязнений и невозможность исправления брака выдвигают исключительно высокие требования к качеству материалов, точности работы оборудования и условиям производства. Во многих случаях речь идёт о предельно достижимых (на современном уровне техники) требованиях, существенно превосходящих требования, выдвигаемые др. отраслями техники.

Материалы П. э. должны иметь строго заданные состав и структуру, нередко — обладать исключительно высокими чистотой и совершенством структуры. Так, например, Ge высокой чистоты характеризуется содержанием неконтролируемых примесей $< 10^{-10}$.

О требованиях к точности работы оборудования можно получить представление на примере оптико-механических установок. Для создания на поверхности пластины диаметром 30—80 мм сотен тыс. элементов различной формы и размеров применяют шаблоны, при помощи которых последовательно проводят несколько диффузионных процессов, наносят металлические плёнки и т.д. При изготовлении фотошаблонов и совмещении очередного шаблона с рисунком, ранее нанесённым на ПП пластину, точность работы оптико-механического оборудования должна составлять десятые доли мкм. Поэтому оптическая часть оборудования, разработанного специально для нужд П. э., характеризуется сверхвысокой разрешающей способностью, достигающей более 1000 линий на мм (у применяемых фотоматериалов она ещё выше — 1500 линий на мм), и не имеет аналогов в др. областях техники. Уменьшение размеров элемента до 1 мкм и переход к субмикронным размерам создают значительные трудности, обусловленные главным образом явлением дифракции. Их преодоление — в переходе от световых лучей к электронным, которые могут быть сфокусированы до десятых и сотых долей мкм. В этом случае минимальный размер элемента будет определяться диаметром электронного луча. Механическая обработка ПП пластин должна осуществляться по 14-му классу чистоты обработки поверхности, с отклонениями от плоскости (плоскостностью), не превышающими 1 мкм. Особые требования выдвигаются также и по отношению к термическому оборудованию: точность установки и поддержания температуры на уровне 1000—1300 °С должна быть не хуже $\pm 0,5$ °С.

Очень жёсткие требования предъявляются к условиям производства изделий П. э. Газовая среда, в которой проходят некоторые, наиболее важные технологические процессы, должна подвергаться тщательной сушке и обеспыливанию. Содержание в ней влаги измеряется долями процента и оценивается по температуре газа, при которой наступает конденсация влаги (по точке росы). Если в цеховой атмосфере поддерживается т. н. комфортная влажность (соответствующая относительной влажности 50—60%), то в специальные боксы (скафандры), в которых осуществляется, например, сборка изделий (*рис. 3*), подаётся воздух, азот или аргон, осушенный до точки росы, равной — (50—70) °С. Один из наиболее серьёзных врагов ПП производства — пыль. Одна пылинка размером в несколько мкм, попавшая на поверхность пластины в ходе процессов фотолитографии, почти всегда приводит к неисправимому браку. В зависимости от сложности изделия и некоторых др. требований запылённость воздуха на рабочем месте возле обрабатываемой ПП пластины должна составлять не более 4000 пылинок на м³. Столь низкий уровень запылённости обеспечивается оборудованием внутри цехов т. н. чистых комнат, доступ в которые разрешается только ограниченному кругу лиц. Персонал, работающий в чистых комнатах, переодевается в специальную одежду и проходит к рабочему месту через герметичные шлюзы, где производится обдув одежды и удаление пыли. В чистых комнатах до 300 раз в час совершается полный обмен воздуха с пропусканием его через соответствующие фильтры. Совершенно обязательно соблюдение персоналом требований личной гигиены: регулярное и тщательное мытьё рук, ношение специальной одежды, перчаток, шапочек и косынок и т.д. Все эти меры являются совершенно необходимым условием для обеспечения высоких экономических показателей и качества выпускаемой продукции, в том числе надёжности изделий.

Совершенствование радиоэлектронной аппаратуры (на базе достижений П. э.). Считается, что аппаратура на электронных лампах — это первое поколение электронной аппаратуры, на дискретных ПП приборах — второе поколение, на интегральных

микросхемах — третье поколение. Появление плоскостных диодов и транзисторов дало возможность перейти к замене электровакуумных приборов полупроводниковыми. Это позволило в десятки раз уменьшить массу и габариты аппаратуры, понизить потребляемую ею мощность, повысить надёжность её работы. Практическим пределом миниатюризации электронной аппаратуры с помощью дискретных элементов стала микромодульная конструкция (см. [Микромодуль](#)). Дальнейшее уменьшение габаритов аппаратуры путём уменьшения размеров дискретных деталей и элементов привело бы к значительному росту трудоёмкости сборки и, что особенно опасно, к резкому снижению надёжности аппаратуры за счёт ошибок и недостаточно высокого качества соединений. Переход к интегральной микроэлектронике явился качественным скачком, открывшим возможность дальнейшего уменьшения габаритов и повышения надёжности электронного оборудования; появилась возможность включать в состав интегральной микросхемы различные электропреобразовательные приборы, приборы [оптоэлектроники](#), акустоэлектроники и приборы др. классов.

Новые принципы изготовления электронных устройств, развившиеся, с одной стороны, из техники [печатного монтажа](#) (гибридные интегральные микросхемы) и, с др. стороны, из техники группового изготовления многих элементов на одном кристалле (монолитные или ПП интегральные микросхемы), увеличили эквивалентную плотность упаковки элементов (транзисторов, диодов, резисторов) до нескольких тысяч и десятков тысяч элементов в см^2 . Так началась микроминиатюризация электронной аппаратуры. Интегральная микросхема потребовала решения задач схемотехники. П. э. в своём развитии вступила в фазу [микроэлектроники](#).

Развитие микроэлектроники характеризуется быстро нарастающим уровнем интеграции: от нескольких эквивалентных диодов и транзисторов в одном корпусе к изготовлению больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных микросхем. Число функциональных элементов в них может составлять несколько тысяч и даже несколько десятков тысяч (*рис. 4*). Т. н. многокристальные СБИС могут объединять в одном корпусе несколько кристаллов БИС и дискретных бескорпусных диодов и транзисторов, образующих, например, всю электронную часть вычислительной машины, включая и электронную память. При создании таких сложных устройств электронной техники приходится решать уже не только схемотехнические задачи, но и задачи [системотехники](#). Увеличение степени интеграции привело к реализации тех или иных свойств, присущих дискретным приборам, например усилительных (как у транзистора), выпрямляющих (как у диода), в объёмах кристалла, имеющих размер всего лишь несколько десятков или сотен межатомных расстояний. Намечается переход к использованию свойств, распределённых по объёму кристалла, т. е. переход от интеграции электронных приборов с функциями, сосредоточенными в каком-либо объёме, к интеграции функций, распределённых по всему объёму кристалла. Так зарождается четвёртое поколение электронной аппаратуры.

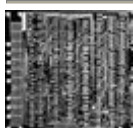
Продукция П. э. Номенклатура ПП приборов исключительно широка, она насчитывает десятки тыс. типов приборов, в основном кремниевых. Мировая промышленность выпускает (1974) свыше 10 млрд. дискретных ПП приборов и более 1 млрд. интегральных микросхем в год. Развитие микроэлектроники не отразилось существенным образом на темпах роста выпуска дискретных ПП приборов; потребность в них, по-видимому, будет сохраняться ещё длительное время. Появление разнообразнейших ПП приборов позволило осуществить сложные, зачастую принципиально новые электронные устройства и создать самостоятельную отрасль [электронной промышленности](#) — промышленность, производящую дискретные ПП приборы и интегральные микросхемы.

Выпускаемые промышленностью изделия П. э. характеризуются высокими эксплуатационными свойствами: они могут работать в диапазоне температур от -60 до $+200$ °С, выдерживать значительные механические и климатические нагрузки (вибрации, удары, постоянные ускорения, циклические изменения температуры, воздействие влаги и т.д.); они характеризуются интенсивностью отказов $\sim 10^{-6}$ — 10^{-9} отказа в час в реальных условиях эксплуатации.

Перспективы развития. Развитие П. э. происходит в направлении быстрого возрастания степени интеграции, которая часто достигает 10—20 тыс. ПП приборов на одном кристалле (1975), а также в направлении повышения мощности и частоты электромагнитных колебаний, преобразуемых в одном ПП приборе (до сотен *вт* и десятков *Гц*), в том числе создания ПП генераторов и усилителей миллиметрового диапазона. Наряду с интеграцией большого числа сходных приборов развивается также интеграция в одной микросхеме приборов, использующих различные физические принципы. При этом, помимо физических процессов в полупроводниках, используют процессы в диэлектриках, сверхпроводниках (например, [*Джозефсона эффект*](#)), магнитных плёнках и т.д. ПП элементы, например холодные катоды с [*полупроводниковыми гетеропереходами*](#), ПП аноды с *p—n*-переходом, в котором происходит умножение тока, матричные мишени [*видиконов*](#), содержащие 0,5—1 млн. фотодиодов, проникают также в вакуумную электронику, позволяя существенно усовершенствовать некоторые типы электровакуумных приборов.

Лит.: Иоффе А. Ф., физика полупроводников, [2 изд.], М. — Л., 1957; Федотов Я. А., Основы физики полупроводниковых приборов, М., 1970; Интегральные схемы, пер. с англ., М., 1970; Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Шинков А. Д., Полупроводниковые приборы, М., 1973; Кремниевые планарные транзисторы, под ред. Я. А. Федотова, М., 1973.

А. И. Шокин.



[Рис. 4. Большая интегральная микросхема для электронных часов. В кристалле кремния с активной площадью около \$3 \text{ мм}^2\$ создано 1438 *p*- и *r*-канальных полевых транзисторов, образующих посредством двухслойной системы связей микро-ЭВМ, которая ведёт отсчёт текущего времени суток \(секунд, минут, часов\), дней недели, дат; расходуемая мощность не более \$10 \text{ мкВт}\$.](#)



[Рис. 1. Универсальная ионнолучевая установка «Везувий-1» \(СССР\) с энергией ионов до \$200 \text{ кэВ}\$, позволяющая осуществлять ионное легирование полупроводниковых материалов](#)

практически любыми примесями: 1 — пульт управления; 2 — источник и ускоритель ионов; 3 — магнитный сепаратор ионов; 4 — камера легирования.



Рис. 3. Участок цеха, в котором производится чистая сборка полупроводниковых приборов.



Рис. 2. Структура мощного СВЧ кремниевого транзистора, позволяющего получить мощность 5 Вт на частоте 2 ГГц (фотография; увеличено). Транзистор содержит 234 эмиттера с размерами 1,5×30 мкм и 18 стабилизирующих резисторов; 18 алюминиевых проволочек соединяют кристалл прибора с выводами.

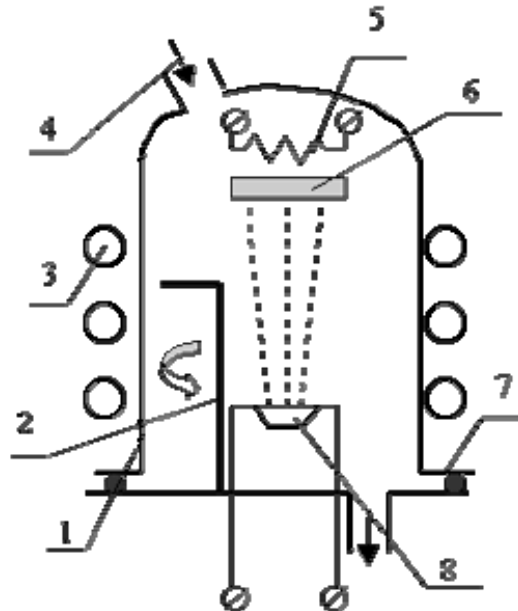
Таблица некоторых физических свойств важнейших полупроводниковых материалов

Элемент, тип соедине- ния	Наиме- нование материала	Ширина запрещенной зоны, эВ		Подвижност ь носителей заряда, 300 К, см ² /(В·сек)		Кристал- лическая структур а	Постоян- ная решётки , Å	Темпера- тура плавления, °С	Упругост ь пара при темпера- туре плавления, атм
		при 300 К	при 0 К	элек- троны	дырки				
Элемент	C (алмаз)	5,47	5,51	1800	1600	алмаз	3,56679	4027	10 ⁻⁹
	Ge	0,803	0,89	3900	1900	типа алмаза	5,65748	937	
	Si	1,12	1,16	1500	600	»	5,43086	1420	10 ⁻⁶
	α—Sn		~0,08			»	6,4892		
IV—IV	α—SiC	3	3,1	400	50	типа сфалерита	4,358	3100	
III—V	AlSb	1,63	1,75	200	420	типа сфалерита	6,1355	1050	<0,02
	BP	6				»	4,538	>1300	>24
	GaN	3,5				типа вюртцита	3,186 (по оси	>1700	>200

							<i>a</i>) 5,176 (по оси с)		
	GaSb	0,67	0,80	4000	140 0	типа сфалерит а	6,0955	706	<4·10 ⁻⁴
	GaAs	1,43	1,52	8500	400	то же	5,6534	1239	1
	GaP	2,24	2,40	110	75	»	5,4505	1467	35
	InSb	0,16	0,26	7800 0	750	»	6,4788	525	<4·10 ⁻⁵
	InAs	0,33	0,46	3300 0	460	»	6,0585	943	0,33
	InP	1,29	1,34	4600	150	»	5,8688	1060	25
II—VI	CdS	2,42	2,56	300	50	типа вюртцита	4,16 (по оси <i>a</i>) 6,756 (по оси с)	1750	
	CdSe	1,7	1,85	800		типа сфалерита	6,05	1258	
	ZnO	3,2		200		кубич.	4,58	1975	
	ZnS	3,6	3,7	165		типа вюртцита	3,82 (по оси <i>a</i>) 6,26 (по оси <i>c</i>)	1700	
IV—VI	PbS	0,41	0,34	600	700	кубич.	5,935	1103	
	PbTe	0,32	0,24	6000	400 0	то же	6,460	917	

Проводники на поверхности кристалла полупроводниковой ИМС, а также пассивные элементы гибридно-пленочных микросхем создаются на основе тонких плёнок толщиной $0,1 \div 2$ мкм. Высокая точность по толщине и химическая чистота для тонких плёнок могут быть достигнуты только при выращивании слоя из атомарного (молекулярного) потока. Такие условия можно создать в вакууме либо при нагреве, испарении и конденсации материала, либо при бомбардировке твёрдого образца материала (мишени) ионами инертного газа, распыления его в атомарный (молекулярный) поток и конденсации на поверхности изделия.

Процессы первого рода получили название "термическое вакуумное напыление" (ТВН), второго рода - "распыление ионной бомбардировкой" (РИБ).



. Термическое вакуумное напыление.

Основными элементами установки вакуумного напыления, упрощенная схема которой представлена на рис. 21, являются: 1 - вакуумный колпак из нержавеющей стали; 2 - заслонка; 3 - трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака; 4 - игольчатый натекаль для подачи атмосферного воздуха в камеру; 5 - нагреватель подложки; 6 - подложкодержатель с подложкой, на которой может быть размещен трафарет; 7 - герметизирующая прокладка из вакуумной резины; 8 - испаритель с размещённым в нём веществом и нагревателем (резистивным или электронно-лучевым).

Рис. 21 Упрощенная схема рабочей камеры установки термического вакуумного напыления.

Процесс проведения операции вакуумного напыления включает в себя выполнение следующих действий. В верхнем положении колпака с подложкодержателя снимают обработанные подложки и устанавливают новые. Колпак опускают и включают систему вакуумных насосов (вначале для предварительного разрежения, затем высоковакуумный). Для ускорения десорбции воздуха с внутренних поверхностей и сокращения времени откачки в трубопровод подают горячую проточную воду. По достижении давления внутри камеры порядка 10^{-4} Па (контроль по манометру) включают нагреватели испарителя и подложек. По достижении рабочих температур (контроль с помощью термопар) заслонку отводят в сторону и пары вещества достигают подложки, где происходит их конденсация и рост плёнки. Система автоматического контроля за ростом плёнки фиксирует либо толщину плёнки (для диэлектрика плёночных конденсаторов), либо поверхностное сопротивление (для резисторов), либо время напыления (проводники и контакты, защитные покрытия). Выбрасываемый при этом сигнал об окончании напыления после усиления воздействует на соленоид заслонки, перекрывая ею поток пара. Далее отключают нагреватели испарителя и подложек, выключают систему откачки, а в трубопровод подают холодную проточную воду. После остывания подколпачных устройств через натекаль плавно впускают атмосферный воздух. Выравнивание давлений внутри и вне колпака даёт возможность поднять его и начать следующий цикл обработки.

Процесс термического вакуумного напыления характеризуется температурой на испарителе $t^{\circ}_{ис}$, давлением воздуха в рабочей камере P_0 , температурой нагрева подложек $t^{\circ}_{п}$. Температура нагрева вещества в испарителе ($t^{\circ}_{ис}$) должна обеспечивать достаточно высокую интенсивность испарения, чтобы время напыления пленки не превышало 1-2 минут. В то же время чрезмерно высокая интенсивность приводит к образованию мелкозернистой неустойчивой структуры в плёнке, о чём будет сказано ниже.

Интенсивность испарения удобно характеризовать упругостью пара (давлением пара в состоянии насыщения) P_s . Упругость пара для данного вещества зависит только от температуры:

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T} \quad (42)$$

где A и B - коэффициенты, характеризующие род материала (табл. 6); T - абсолютная температура вещества, К.

Таблица 6. Температуры плавления и испарения некоторых элементов.

Элемент	$t_{\text{пл}}^{\circ\text{C}}$	$t_{\text{уст}}^{\circ\text{C}}$	Коэффициенты		Рекомендуемые материалы испарителя	
			A	B	Проволоки, ленты	Тигля
Ag	961	1047	(11,40)	(14850)	Mo, Ta	Mo, C
			10,78	14090		
Al	660	1150	11,11	15630	W	C, BN, TiB ₂ —BN
Au	1063	1465	10,77	18250	W, Mo	Mo, C
Cr	1800	1205	(12,00)	(17560)	W, Ta	—
Cu	1083	1273	10,84	16580	W, Mo, Ta	Mo, C, Al ₂ O ₃
Mo**	2622	2533	(10,92)	(30310)	—	—
Ni	1455	1510	(12,40)	(21840)	W	Окислы
			11,67	20600		
Pd	1555	1566	10,58	19230	W	Al ₂ O ₃
Pt	1774	2090	11,75	27500	W	ThO ₂ , ZrO ₂
Ta**	2996	3070	12,12	40210	—	—
Ti	1725	1546	(10,37)	(18640)	W, Ta	C, ThO ₂
			11,10	20110		
W**	3382	3309	(11,36)	(40260)		

* Значения в скобках для твердого состояния.

** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Оптимальной интенсивностью испарения принято считать интенсивность, при которой упругость пара составляет $\sim 1,3$ Па. Соответствующая этой упругости температура испарения называется условной и может быть вычислена из (42). Так, для алюминия она равна 1150°C, для хрома - 1205°C, для меди - 1273°C, для золота - 1465°C и т.д.

Низкое давление воздуха P_0 в рабочей камере необходимо для:

1. обеспечения свободной диффузии атомов вещества испарителя в объём рабочей камеры;
2. прямолинейного движения атомов вещества без столкновения с молекулами остаточного воздуха и бесполезного рассеивания материала в объёме камеры;
3. исключения химического взаимодействия напыляемого вещества с молекулами воздуха.

Перечисленные условия обеспечиваются при остаточном давлении $P_0 \leq 10^{-4}$ Па. Такой вакуум сравнительно легко достигается с помощью форвакуумного механического и высоковакуумного диффузионного насосов, включённых последовательно.

Температура подложки в процессе осаждения оказывает существенное влияние на структуру плёнки, а, следовательно, и на стабильность её электрофизических свойств в процессе эксплуатации.

Атомы вещества поступают на подложку с энергией κT ($\kappa = 8,63 \times 10^{-5}$ эВ/К- постоянная Больцмана; T - абсолютная температура) и скоростями порядка 1000 м/с. Часть энергии при этом передаётся поверхностным атомам подложки, а остаточная энергия позволяет им некоторое время мигрировать в поверхностном потенциальном поле. Доля остаточной энергии тем выше, чем выше температура подложки. В процессе миграции атом может либо покинуть подложку (на потенциальном бугре поля), либо частично погасить энергию, вступив во взаимодействие с другим мигрирующим атомом. Полностью потерять способность мигрировать и закрепиться на нагретой подложке

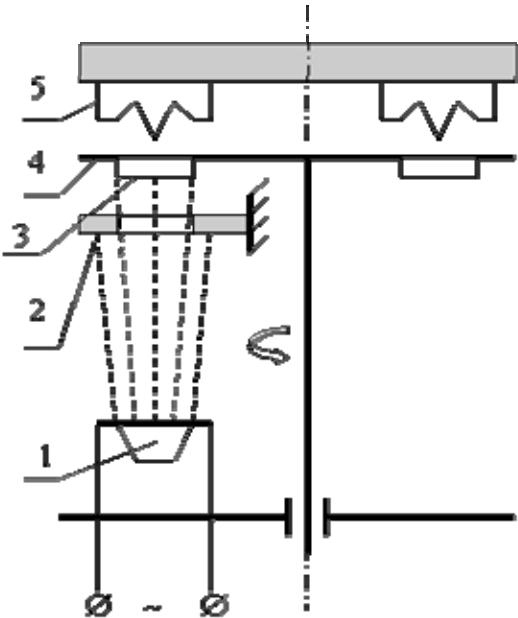


Рис. 22. Схема установки термовакuumного напыления карусельного типа: 1 – испаритель; 2 – корректирующая диафрагма; 3 – подложкодержатель с подложкой; 4 – диск карусели; 5 – нагреватель подложки.
удельного сопротивления.

(конденсироваться) может лишь многоатомная группа, которая становится одним из центров кристаллизации. При невысокой плотности потока атомов, т.е. умеренной температуре на испарителе, число центров кристаллизации на единицу площади невелико и к моменту образования сплошной плёнки вокруг них успевают вырасти крупные кристаллы.

Снижение температуры подложки и повышение плотности потока приводит к более раннему образованию центров кристаллизации, увеличению их числа на единицу площади и формированию мелкокристаллической структуры. В процессе эксплуатации электронной аппаратуры, когда она подвергается периодическим циклам нагрева и медленного охлаждения мелкокристаллическая структура постепенно рекристаллизуется в крупнокристаллическую. Электрофизические свойства при этом необратимо изменяются, происходит "старение" плёнки. В резистивных плёнках, например, наблюдается со временем уменьшение

Итак, для формирования тонких плёнок, стабильных в процессе эксплуатации, необходимо подложку нагревать и не форсировать процесс напыления за счёт повышения температуры на испарителе.

В производстве тонкоплёночных структур, как и в случае полупроводниковых, используются групповые подложки. Групповые подложки имеют прямоугольную форму с размерами 60x48 мм или 120x96 мм, изготовлены из изолирующего материала (ситалл, поликор, стекло) и рассчитаны на одновременное изготовление до нескольких десятков идентичных модулей. Таким образом, свойства напыленной плёнки должны быть одинаковы на всей площади групповой подложки.

В первом приближении поток атомов от испарителя к подложке представляет собой расходящийся пучок и поэтому плотность потока в плоскости подложки не равномерна: в центре подложки она максимальна и убывает от центра к периферии. Это означает, что при напылении плёнки на неподвижную подложку в центральной области подложки образуется более толстая плёнка, нежели на краях подложки. Например, резисторы, сформированные в центральных модулях, будут иметь заниженные сопротивления по сравнению с аналогичными резисторами периферийных модулей.

С учётом изложенного производственные установки термовакuumного напыления снабжены вращающимися устройствами (дисками, барабанами), несущими несколько подложек (6, 8 или 12). Подложки последовательно и многократно проходят над неподвижным испарителем (рис. 22), постепенно набирая необходимую толщину плёнки. В результате центральный "холм", который мог бы образоваться, на неподвижной подложке, размывается в "хребет", вытянутый в направлении движения подложки. Для выравнивания толщины плёнки в поперечном направлении применяют корректирующую диафрагму, устанавливаемую между испарителем и подложкой в непосредственной близости от нее. Профиль диафрагмы рассчитывается на основании исследования рельефов плёнки, получаемых при напылении на неподвижную и движущуюся подложки. В результате различия времени облучения центральной и периферийной зон подложки

равномерность толщины плёнки на всей площади групповой подложки повышается и находится в пределах $\pm 2\%$ (для подложек 60x48 мм).

Технические характеристики установки типа УВН-71П-3 следующие:

Предельный вакуум в рабочей камере, Па	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Размеры рабочей камеры, мм: Диаметр	500
Высота	640
Максимальная температура нагрева рабочей камеры, °C	90
Количество резистивных испарителей, шт	3
Питание испарителей: мощность, кВт	2
максимальный ток, А	500
Скорость автоматического вращения карусели, об/мин	50...100
Количество подложек, обрабатываемых за один цикл, шт	11
Температура нагрева подложек, °C	до $400 \pm 1,5$
Расход воды, л/ч: Холодной	600
Горячей	200
Расход сжатого воздуха, л/ч,	30
Максимальная потребляемая мощность, кВт	12
Габаритные размеры установки, мм	1300X850X1870
Общая масса, кг	1200

13.2. Распыление ионной бомбардировкой.

Термическое вакуумное напыление имеет ряд недостатков и ограничений, главные из которых следующие:

1. Напыление плёнок из тугоплавких материалов (W, Mo, SiO₂, Al₂O₃ и др.) требует высоких температур на испарителе, при которых неизбежно "загрязнение" потока материалом испарителя.
2. При напылении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава плёнки по сравнению с исходным составом материала, помещённого в испаритель.
3. Инерционность процесса, требующая введения в рабочую камеру заслонки с электромагнитным приводом.
4. Неравномерность толщины плёнки, вынуждающая применять устройства перемещения подложек и корректирующие диафрагмы.

Первые три недостатка обусловлены необходимостью высокотемпературного нагрева вещества, а последний - высоким вакуумом в рабочей камере.

Процесс распыления ионной бомбардировкой является "холодным" процессом, т.к. атомарный поток вещества на подложку создаётся путём бомбардировки поверхности твёрдого образца (мишени) ионами инертного газа и возбуждения поверхности атомов до энергии, превышающей энергию связи с соседними атомами. Необходимый для этого поток ионов создаётся в электрическом газовом разряде, для чего давление газа в рабочей камере должно быть в пределах $0,1 \times 10$ Па, т.е. на несколько порядков более высокое, чем в камере установки термовакuumного напыления.

Последнее обстоятельство приводит к рассеиванию потока атомов с мишени и повышению равномерности толщины осаждаемых плёнки до $\pm 1\%$, причём без применения дополнительных устройств.

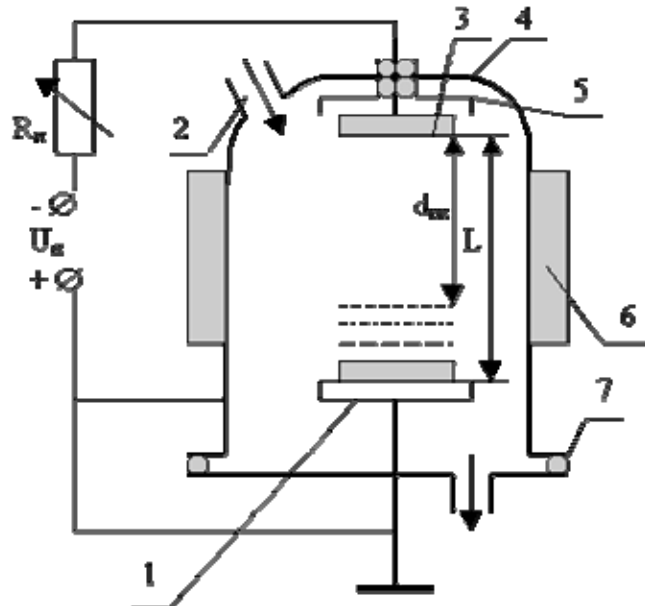


Рис. 23 Упрощенная схема рабочей камеры установки катодного распыления.

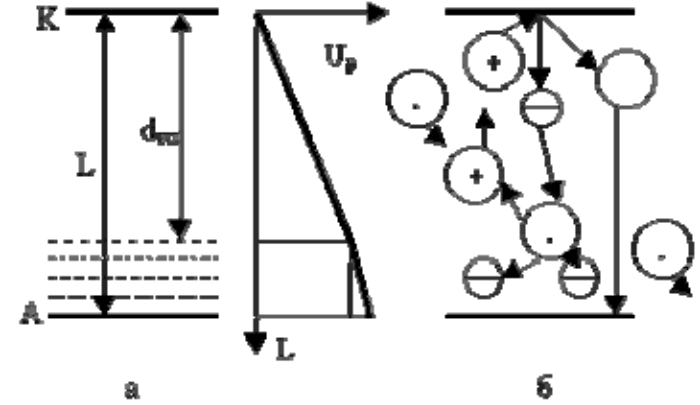


Рис. 24 Распределение потенциала (а) и зарядовых частицы (б) в межэлектродном пространстве.
 . - молекула аргона; + - ион аргона; - - электрон; (большой круг) - атом распыляемого вещества.

Катодно
распыле-
ние.

Катодно
распыле-
ние -
одна
из
разн

овидностей распыления ионной бомбардировкой постепенно вытесняется более совершенными процессами высокочастотного и магнетронного распыления. Однако, будучи относительно простым и в то же время содержащим все основные черты этой группы процессов, оно представляет собой наиболее удобную форму для изучения процессов этого вида распыления вообще. На рис. 23 представлена схема рабочей камеры установки катодного распыления. Основными элементами камеры являются: 1 - анод с размещенными на нём подложка-ми; 2 - игольчатый натекатель, обеспечивающий непрерывную подачу аргона; 3 - катод - мишень из материала, подлежащего распылению и осаждению; 4 - вакуумный колпак из нержавеющей стали; 5 - экран, охватывающий катод с небольшим зазором и предотвращающий паразитные разряды на стенки камеры; 6 - постоянный электромагнит, удерживающий электроны в пределах разрядного столба; 7 - герметизирующая прокладка. Из рис. 6.23 также видно, что питание осуществляется постоянным напряжением, и что нижний электрод с подложками заземлён и находится под более высоким потенциалом, чем катодмишень. Переменная нагрузка служит для регулирования тока разряда.

На рис. 24 представлена упрощённая структура разряда и распределение потенциала вдоль разряда, а также типы частиц, участвующих в процессе. Разряд разделён на две зоны: тёмное катодное пространство и светящаяся область. На тёмное катодное пространство приходится основное падения напряжения. Здесь заряженные частицы разгоняются до энергии, достаточной, чтобы ионы, бомбардируя катод-мишень, освобождали поверхностные атомы и электроны (если мишень из проводящего материала), а электроны - на границе тёмного катодного пространства ионизировали молекулы аргона. При ионизации образуется ион аргона, который, ускоряясь, стремится к мишени, и электрон, который, как и "отработанный" ионизирующий электрон, дрейфует к аноду в слабом поле светящейся области. Освобожденный с поверхности мишени атом вещества, преодолевая столкновения с молекулами и ионами аргона, достигает поверхности подложки. При этом непрерывный поток ионов бомбардирует мишень, и непрерывный поток атомов вещества движется к подложке.

Режимы катодного распыления.

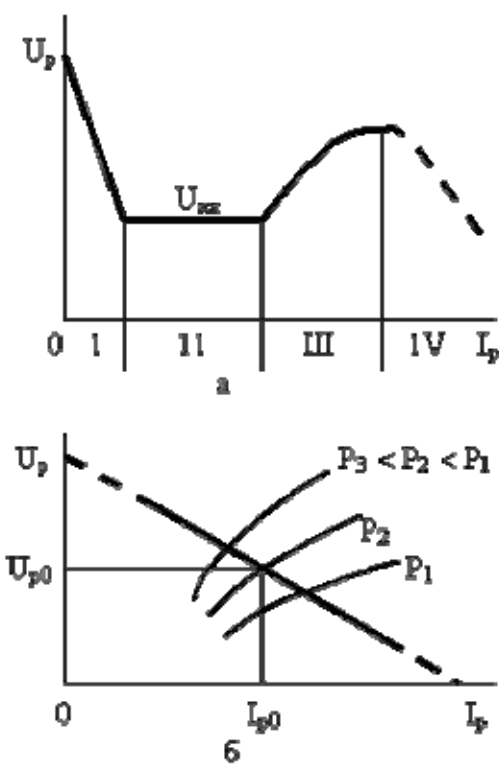


Рис. 25. Вольт-амперные характеристики самостоятельного тлеющего разряда: а – области ВАХ при различных режимах; б – рабочая область (область III) при различных давлениях аргона.

На рис. 25а приведена вольт-амперная характеристика разряда. При подаче постоянного напряжения в несколько киловольт происходит пробой межэлектродного промежутка, быстрое нарастание тока и падение напряжения в разряде (область зажигания разряда I). При увеличении тока разряда за счёт уменьшения сопротивления R_n площадь катода-мишени, покрытая разрядом, возрастает, плотность разрядного тока и напряжение на разряде остаются постоянными и невысокими, а скорость распыления мала (область нормально тлеющего разряда II). В области III вся площадь мишени покрыта разрядом, и увеличение разрядного тока приводит к повышению плотности разрядного тока, напряжения на разряде и скорости распыления. Область III, называемая областью аномально тлеющего разряда, используется в качестве рабочей области в процессах катодного распыления. Для предотвращения перехода в область дугового разряда (область IV) предусмотрены интенсивное водяное охлаждение мишени и ограничение источника питания по мощности.

На рис. 25,б выделена рабочая область III ВАХ. Крутизна характеристики в этой области зависит от давления рабочего газа, в нашем случае аргона. Рабочая точка, характеризующая режимы обработки – давление газа P , ток J_p и напряжение U_p разряда, лежит на нагрузочной характеристике источника питания:

$$U_p = U_n - J_p R_n \quad (43)$$

где U_n - напряжение питания.

С другой стороны, скорость распыления мишени W [г/см²×с]

$$W = C \cdot \frac{(U_p - U_{нк}) j_p}{p \cdot d_{тп}} \quad (44)$$

где C - коэффициент, характеризующий род распыляемого материала и род рабочего газа; $U_{нк}$ - нормальное катодное падение напряжения (область II ВАХ); j_p - плотность разрядного тока; $d_{тп}$ - ширина тёмного катодного пространства.

Из (44) следует, что максимальная скорость распыления достигается при максимальной мощности, выделяемой в разряде. Согласно нагрузочной характеристике (43):

$$P = U_p J_p = U_n J_p - J_p^2 R_n \quad (45)$$

Максимум этой функции определяет оптимальные значения тока J_{p0} и напряжения

$J_{p0} = \frac{U_n}{2R_n}$ и $U_{p0} = \frac{U_n}{2}$. При этом однозначно определяется оптимальное значение давления рабочего газа. Выбор значений U_n и R_n должен, как было сказано, предотвращать переход в область дугового разряда, при котором наблюдается выброс с мишени крупных частиц и осаждение тонкой, однородной по толщине плёнки становится невозможным.

Другие виды распыления.

К ограничениям и недостаткам процесса катодного распыления относятся

1. Возможность распыления только проводящих материалов, способных эмиттировать в разряд электроны, ионизирующие молекулы аргона и поддерживающие горение разряда.
2. Малая скорость роста плёнки (единицы нм/с) из-за значительного рассеивания распыляемых атомов материала в объёме рабочей камеры.

Первый недостаток, имеющий характер ограничения, преодолевается в процессах *высокочастотного распыления*. При замене постоянного напряжения на переменное диэлектрическая мишень становится конденсатором и подвергается бомбардировке ионами в отрицательный полупериод питающего напряжения. Иначе говоря, распыление мишени происходит не непрерывно, как при катодном распылении, а дискретно с частотой питающего напряжения (обычно 13,56 МГц).

При высокой частоте и согласованном с ним расстоянием от мишени до подложек электроны, находящиеся в срединной части высокочастотного разряда, не успевают достигать электродов за время полупериода, они остаются в разряде, совершая колебательные движения и интенсивно ионизируя рабочий газ. Это обстоятельство позволяет снизить давление рабочего газа без снижения разрядного тока, т.к. степень ионизации заметно повышается (второй недостаток катодного распыления). Характерные режимы высокочастотного распыления: $P=0,5 \dots 5$ Па; $J_p=1 \dots 2$ А; $U_p=1 \dots 2$ кВ.

В установках *магнетронного распыления* (в частности ВЧ-магнетронного) приняты меры для дальнейшего, существенного снижения давления рабочего газа и повышения за счёт этого скорости осаждения плёнки. С этой целью на разрядный столб накладывается постоянное магнитное поле, вектор которого перпендикулярен вектору электрического поля. В результате движение электронов происходит по сложным (близким к циклоидам) траекториям, степень ионизации рабочего газа существенно повышается и это даёт возможность снизить давление газа, не снижая (и даже повышая) разрядный ток. Главный итог этих мер - повышение скорости роста плёнки до нескольких нм/с, что сравнимо со скоростями в процессах термического вакуумного напыления. Характерные режимы ВЧ-магнетронного распыления: $P=0,1 \dots 0,5$ Па; $J_p=2 \dots 4$ А; $U_p=0,7 \dots 1$ кВ.

Разрезка монокристалла и получение пластин.

Разрезку монокристаллов на пластины осуществляют чаще всего абразивными дисками с режущей кромкой, покрытой алмазной крошкой размером 40...60 мкм. Толщина режущей алмазной кромки диска 0,18...0,20 мм, при этом ширина реза получается 0,25...0,35 мм.

Так как на поверхности пластин остаются царапины, сколы, трещины и другие дефекты, нарушающие однородность структуры поверхностного слоя, их шлифуют, травят и полируют. При шлифовании достигается неплоскопараллельность пластин не более 3 мкм и прогиб по поверхности не более 10 мкм.

При травлении удаляется нарушенный слой толщиной 5...30 мкм и снимаются внутренние напряжения, возникшие в процессе шлифования.

Окончательная тонкая доводка поверхности пластин производится полированием абразивными порошками или пастами, а затем химико-механическим способом с

применением суспензий, золь и гелей. В результате получают полупроводниковую пластину диаметром 20...250 мм толщиной от десятков до нескольких сотен микрометров с шероховатостью обработанной поверхности не более 0,04 мкм.

Изготовление фотошаблонов.

Фотошаблоны широко применяются в технологии интегральных микросхем как на стадии формирования активных элементов в полупроводниковом материале, так и при создании пассивных элементов и межсоединений.

Фотошаблон – стеклянная пластина (подложка) с нанесенным на ее поверхности маскирующим слоем – покрытием, образующим трафарет с прозрачными и непрозрачными для оптического излучения участками. В процессе *фотолитографии* слой *фоторезиста* экспонируется в соответствии с рисунком покрытия, имеющегося на фотошаблоне.

Подложку фотошаблона выполняют либо из обычного стекла (при экспонировании светом с длиной волны λ более 300 нм), либо из кварцевого стекла (при λ менее 300 нм). В качестве материала маскирующего слоя фотошаблона обычно используется хром, оксиды хрома, железа и др., образующие твердые износостойкие покрытия.

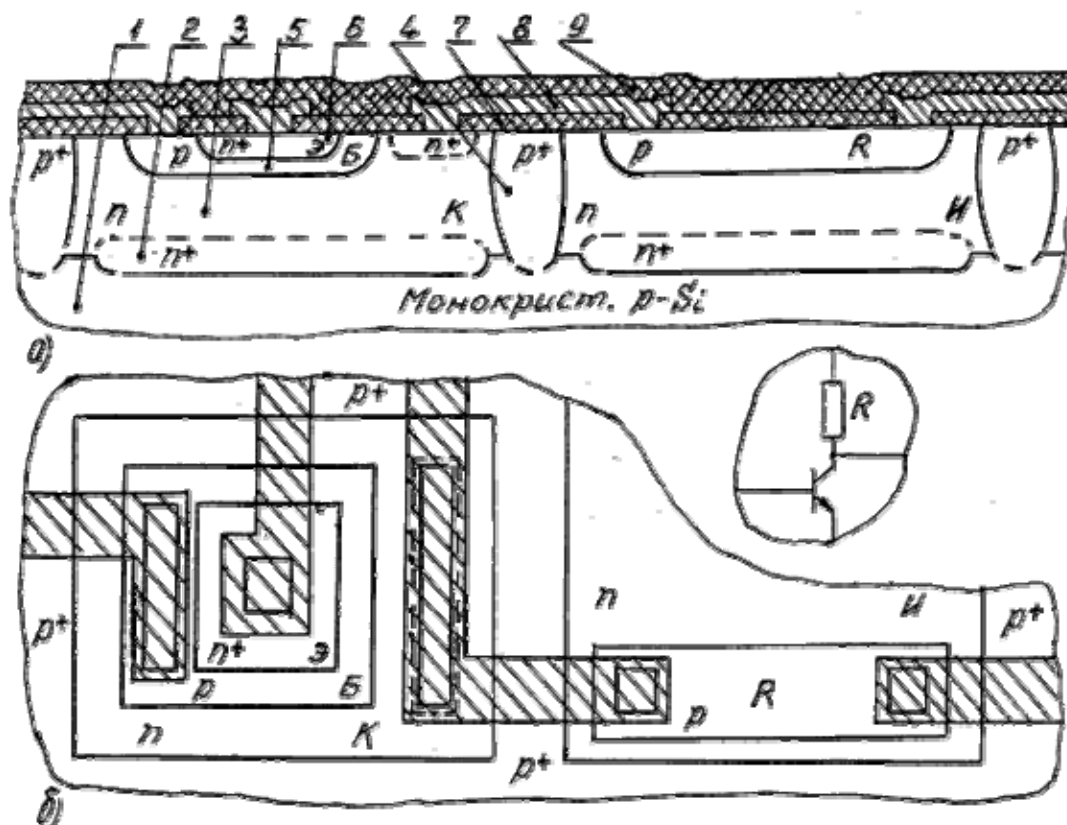
К фотошаблонам для производства полупроводниковых структур предъявляется комплекс требований, к которым в первую очередь следует отнести следующие: оптическая плотность маскирующего материала должна быть не менее 2,0; толщина маскирующего материала – не более 100 нм; его отражательная способность не выше 15%; неплоскостность от нескольких мкм до десятков мкм (для разных классов фотошаблонов); микродефектность порядка $0,1 \text{ см}^{-2}$; краевая четкость рисунка не ниже 0,1 мкм для элементов изображения с размером менее 1 мкм.

Понятие о структуре и топологии.

Конструкция полупроводниковой микросхемы полностью определяется её физической структурой (совокупностью слоёв в кристалле, отличающихся материалом и электрофизическими свойствами) и **топологией** (формой, размерами, относительным расположением отдельных областей и характером межсоединений по поверхности кристалла). Можно также сказать, что структура – это чертёж поперечного сечения кристалла интегральной микросхемы, а топология – вид в плане.

На рис 4,а приведен фрагмент структуры микросхемы, представляющей n-p-n-транзистор и включённый в коллекторную цепь резистор, а на рис. 4,б – топология этого же участка. На рис. 4,а цифрами обозначены: 1 – исходная монокристаллическая пластина – подложка; 2 – открытый слой; 3-эпитаксиальный слой (он же коллекторный); 4 – разделительный слой; 5 – базовый слой; 6 – эмиттерный слой; 7 – изолирующий слой с контактными окнами; 8 – слой металлизации; 9 – защитный слой (обычно SiO_2).

Рис. 4. Фрагмент интегральной микросхемы: а – структура; б – топология.



Каждый из слоёв 2...6 представляет собой совокупность отдельных островков (областей), имеющих одинаковые толщины, тип проводимости (электронная n или дырочная p) и характер распределения примеси по толщине. Это достигается одновременным введением примеси через окна защитной маски из SiO_2 , формируемой предварительно на поверхности пластины-кристалла. В отличие от слоёв 2...6 слои 7, 8 и 9 получают путём формирования сплошной плёнки и последующего избирательного травления с использованием фотошаблона. В результате изолирующий слой 7 (SiO_2) содержит контактные окна, слой металлизации 8 (обычно Al) – систему соединительных проводников и периферийные монтажные площадки, а слой 9 – окна над монтажными площадками.

Приведённая структура получила название *эпитаксиально-планарной* и предполагает взаимную изоляцию смежных элементов за счёт обратносмещенных p - n -переходов на границах изолирующего слоя. Высоколегированный скрытый слой (n^+) служит для уменьшения сопротивления коллекторов транзисторов и за счёт этого повышения их быстродействия. Области n^+ под коллекторными контактами исключают образование *потенциального барьера (барьера Шоттки)*, обеспечивают, таким образом, омический контакт со слаболегированным коллектором и принадлежат эмиттерному слою.

5.2. Цикл формирования топологических слоёв.

Слои 2...6, находящиеся в объёме полупроводникового кристалла, формируются с помощью однотипного повторяющегося цикла (рис. 5): “окисление поверхности (SiO_2) – фотолитография с образованием оксидной маски – внедрение легирующей примеси через окна маски – травление окисла”. Рисунок оксидной маски определяется рисунком фотошаблона, используемого в процессе фотолитографии. Таким образом, для создания всех слоёв требуется комплект фотошаблонов с различными рисунками.

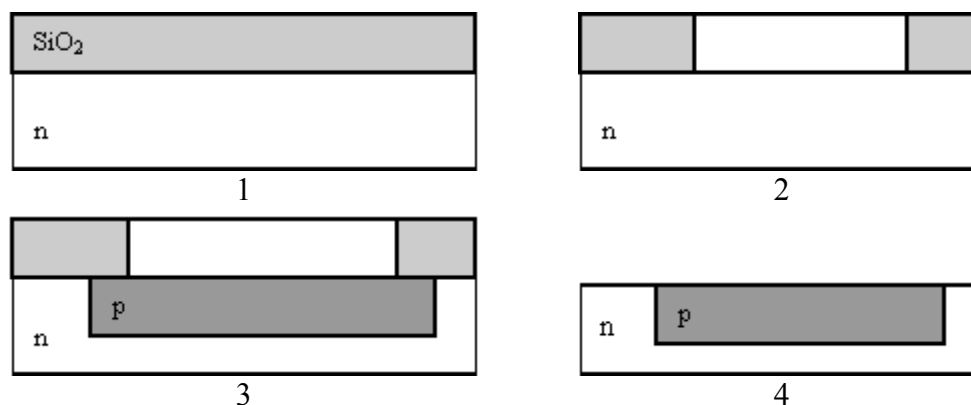


Рис. 5. Последовательность формирования топологического слоя в объеме кристалла: 1 - окисление поверхности; 2 - фотолитография; 3 - внедрение примеси; 4 - травливание окисла.

В соответствии с этим циклом последовательность формирования полупроводниковой структуры выглядит следующим образом. В исходной пластине-подложке p -типа формируются области скрытого слоя (n^+). Далее осаждается сплошной монокристаллический (эпитаксиальный) слой кремния n -типа, поверхность которого окисляется. Затем формируются области разделительного слоя (p^+) с таким расчётом, чтобы они сомкнулись с подложкой. Образующиеся при этом островки эпитаксиального слоя образуют коллекторный слой (n). Внутри коллекторных областей формируются базовые p -области (базовый слой), а внутри базовых областей – эмиттерные (эмиттерный n^+ -слой).

В дальнейшем обработка происходит на поверхности: формируются изолирующий слой (SiO_2), слой металлизации (Al) и защитный слой (SiO_2). При этом используется цикл “нанесение сплошной плёнки – фотолитография”.

Таким образом, для получения рассматриваемой структуры необходим комплект из 8 фотошаблонов.

Легирование методом термической диффузии примесей.

6.1. Условия возникновения р-п-перехода.

6.2. Факторы, определяющие скорость процесса диффузии.

6.3. Функция распределения концентрации примеси по глубине.

6.4. Диффузия из постоянного внешнего источника (одностадийный процесс).

6.5. Диффузия из конечного поверхностного источника (вторая стадия двухстадийного процесса).

6.6. Рабочая камера диффузионной печи.

6.7. Расчет режимов термической диффузии.

6.1. Условия возникновения р-п-перехода.

В подавляющем большинстве случаев легирующая примесь вводится в монокристаллический кремний с целью изменения типа проводимости и образования р-п-перехода на определённой глубине. Изменение типа проводимости имеет место в случае, если максимальная концентрация введённой примеси превышает концентрацию исходную ($N_{исх}$). Образование р-п-перехода происходит на глубине X_n , где концентрация введённой примеси оказывается равной исходной.

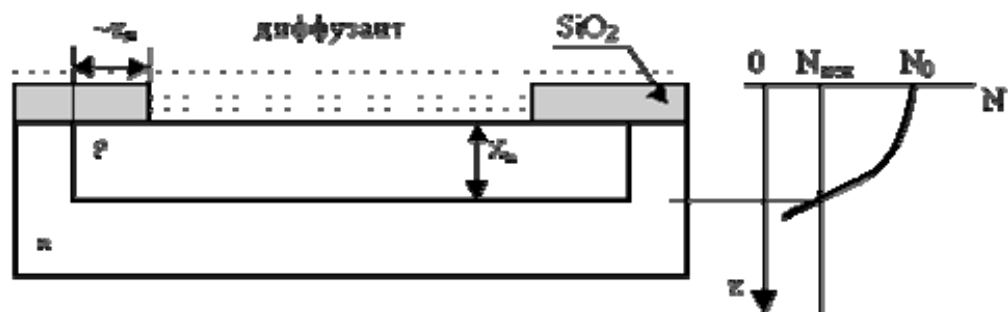


Рис. 6. Принцип образования р-п-перехода.

При термической диффузии (рис. 6) максимальная концентрация примеси всегда на поверхности (N_0) и монотонно убывает с глубиной.

6.2. Факторы, определяющие скорость процесса диффузии

Как известно, диффузия атомов или молекул в любой среде (газовой, жидкой, твердой) описывается следующим уравнением (1-е уравнение диффузии):

$$|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{\alpha=0}^{q-1} |\alpha\rangle, \quad (1)$$

где J - плотность потока частиц, $\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$;

X - глубина проникновения частиц в направлении X , см, (в рассматриваемом

N - концентрация частиц (атомов примеси), см^{-3} .

Таким образом, множитель $\partial N / \partial X$ представляет собой градиент концентрации примеси [см^{-4}] в направлении X , а коэффициент пропорциональности D [$\text{см}^2 \times \text{с}^{-1}$] – коэффициент диффузии. С повышением температуры процесса коэффициент диффузии быстро (экспоненциально) возрастает, т.к. возрастает энергия атомов легирующей примеси. В плотной структуре оксидной маски (SiO_2) коэффициент диффузии существенно меньше, за счёт чего и обеспечивается избирательность легирования.

При высокой температуре процесса (порядка 1000°C) атомы как исходной, так и вводимой примеси ионизированы и образуют электрическое поле, всегда ускоряющее процесс диффузии. Зависимость коэффициента диффузии (в логарифмическом масштабе) от t° и N_0 при двух значениях $N_{\text{исх}}$ приведена на рис. 7.

6.3 Функция распределения концентрации примеси по глубине.

Концентрация введенной примеси с глубиной меняется непрерывно, что описывается дифференциальным уравнением (*уравнением непрерывности*):

$$\frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{\alpha=0}^{q-1} |\alpha; 0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{\alpha=0}^{q-1} |\alpha; f(\alpha)\rangle, \quad (2)$$

Из уравнения следует, что в элементарном объёме кристалла толщиной ∂X и площадью в 1 см^2 за время ∂t происходит накопление примеси ($\partial N > 0$), если плотность потока убывает ($\partial J < 0$), и наоборот.

Решая совместно уравнения (1) и (2) можно получить 2-е уравнение диффузии, отражающее протекание процесса диффузии во времени:

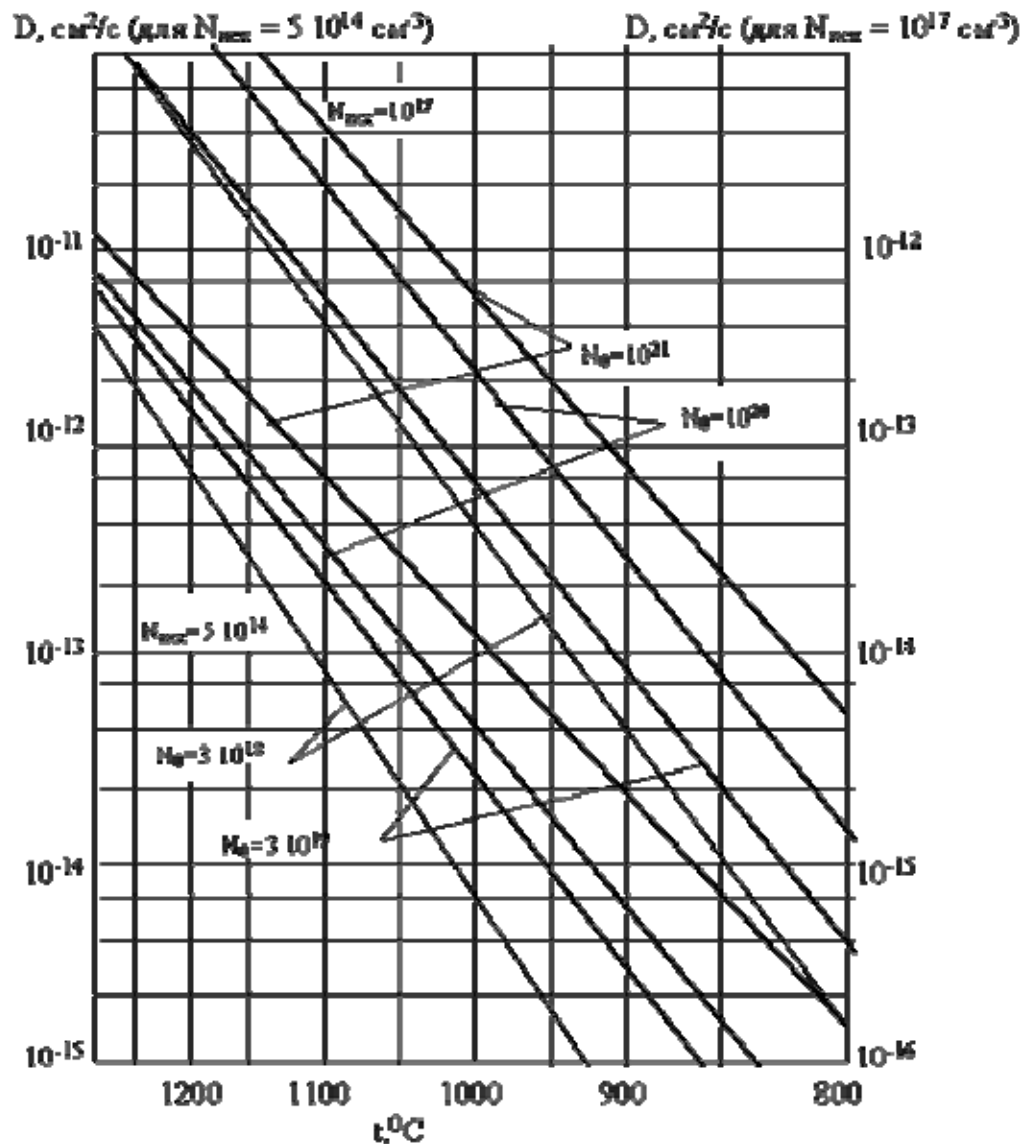


Рис. 7. Температурная зависимость коэффициента диффузии фосфора и бора в кремний, $N_{исх}$ и N_0 - исходная и поверхностная концентрации примеси, см.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (3)$$

Решение уравнения (3) при определённых граничных условиях представляет собой функцию распределения $N(x)$.

На практике используются два варианта проведения процесса: диффузия из постоянного внешнего источника и диффузия из конечного поверхностного источника.

6.4 Диффузия из постоянного внешнего источника (одностадийный процесс).

В этом случае внешний (вне рабочей камеры) источник постоянно поставляет к поверхности пластин-заготовок примесь в газообразном состоянии, причём её

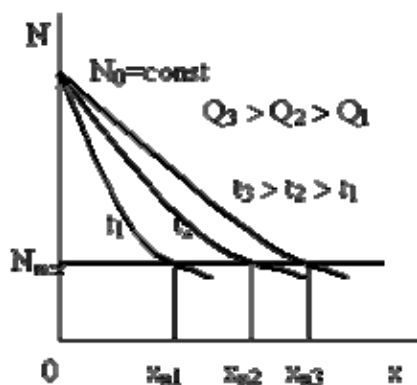
постоянная концентрация N_0 , хотя примесь при этом поступает вглубь кристалла. Процесс выполняют до тех пор, пока р-п-переход не окажется на заданной глубине.

При $N_0 = \text{const}$ решение уравнения (3) приводит к функции:

$$N = N_0 \cdot \text{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (4)$$

где $\text{erfc}V = 1 - \text{erf}V$ – дополнение функции ошибок $\text{erf}V$ (до единицы), которое приведено в таблице 1.

Поскольку в данном случае может быть создана и выдержана до конца процесса предельно высокая концентрация на поверхности кристалла, этот одностадийный процесс рекомендуется для областей n^+ и p^+ (эмиттерные области в биполярных транзисторах, истоки и стоки МДП-транзисторов).



Характер изменения профиля распределения примеси с течением времени приведен на рис. 8., из которого видно, что с течением времени р-п-переход углубляется. Для вычисления необходимого времени ведения процесса технологю должны быть заданы разработчиком физической структуры параметры X_n , N_0 и $N_{\text{исх}}$.

Рис. 8. Изменение профиля распределения примеси с течением времени при постоянном уровне источника.

6.5 Диффузия из конечного поверхностного источника (вторая стадия двухстадийного процесса).

В этом случае поверхность кристалла содержит определённое количество примеси на единицу площади, и процесс сводится к перераспределению (разгонке) её по глубине до тех пор, пока р-п-переход не углубится на заданную величину X_n . Таким образом, количество примеси, введённое предварительно в поверхностный слой, или доза легирования Q [см⁻²] сохраняется постоянной до конца процесса разгонки.

Таблица 1. Значения функции $\text{erfc} V$

V	erfcV	V	erfcV
0.0	1.00000	2.6	2.36×10^{-4}
0.1	0.88754	2.7	1.343×10^{-4}

0.2	0.77730	2.8	7.5×10^{-5}
0.3	0.67135	2.9	4.11×10^{-5}
0.4	0.57161	3.0	2.21×10^{-5}
0.5	0.47950	3.1	1.16×10^{-5}
0.6	0.39614	3.2	6.02×10^{-6}
0.7	0.32220	3.3	3.05×10^{-6}
0.8	0.25790	3.4	1.52×10^{-6}
0.9	0.20309	3.5	7.43×10^{-7}
1.0	0.15730	3.6	3.55×10^{-7}
1.1	0.11979	3.7	1.67×10^{-7}
1.2	0.08969	3.8	7.68×10^{-8}
1.3	0.06599	3.9	3.48×10^{-8}
1.4	0.04771	4.0	1.54×10^{-8}
1.5	0.03389	4.1	6.7×10^{-9}
1.6	0.02365	4.2	2.86×10^{-9}
1.7	0.01621	4.3	1.19×10^{-9}
1.8	0.01091	4.4	4.89×10^{-10}
1.9	0.00721	4.5	1.96×10^{-10}
2.0	4.678×10^{-3}	4.6	7.74×10^{-11}
2.1	2.971×10^{-3}	4.7	2.99×10^{-11}
2.2	1.863×10^{-3}	4.8	1.13×10^{-11}
2.3	1.143×10^{-3}	4.9	4.21×10^{-12}
2.4	6.89×10^{-4}	5.0	1.53×10^{-12}
2.5	4.07×10^{-4}	—	—

При $Q=\text{const}$ решение уравнения (3) приводит к функции:

$$N = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D_p t_p}} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\sqrt{D_p t_p}}\right)^2} \quad (5)$$

где D_p и t_p – коэффициент диффузии и время процесса разгонки. При отсутствии внешнего источника примеси разгонка происходит при непрерывном уменьшении концентрации примеси на поверхности.

Характер изменения распределения времени приведен на рис. 9, из которого следует, что на поверхности п-переход легирования Q , площадью под остаётся неизменной.

Необходимая доза обеспечивается на процесса (загонка постоянным примеси:

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot N_{03} \sqrt{D_3 t_3} \quad (6)$$

где D_3 и t_3 - коэффициент диффузии и время процесса загонки;
 N_{03} -концентрация примеси, поддерживаемая на поверхности пластины в течение процесса загонки.

Двухстадийный процесс рекомендуется для областей с умеренной концентрацией примеси на поверхности и относительно глубоких (базовые области биполярных транзисторов, изолирующие "карманы" в КМДП-структурах). По-прежнему разработчиком структуры должны быть заданы параметры X_n , N_0 и $N_{исх}$, которыми должен обладать слой после второй стадии.

Двухстадийный процесс позволяет осуществлять контроль результатов после первой стадии и корректировать режим второй стадии.

6.6. Рабочая камера диффузионной печи.

Схема рабочей камеры диффузионной печи приведена на рис. 10.

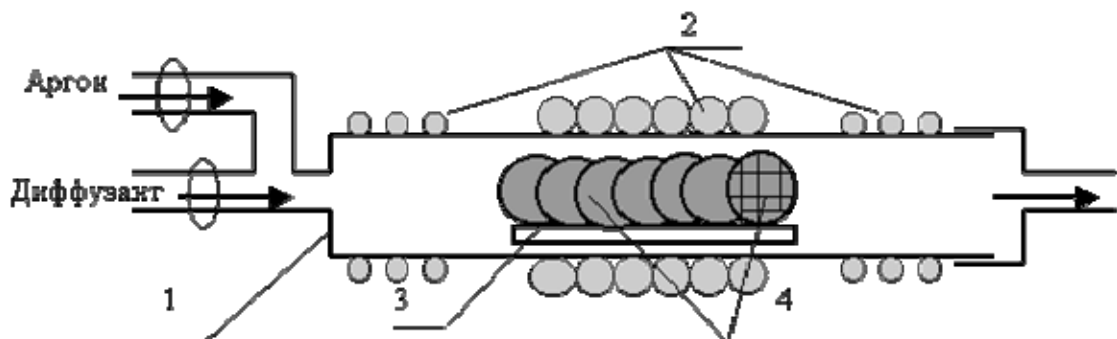


Рис. 10. Схема рабочей камеры диффузионной печи.

Собственно камера представляет собой кварцевую (или керамическую) трубу 1, снабжённую резистивными нагревателями 2 (3 секции с независимым

профиля примеси с течением рис. 9, из которого концентрация примеси постепенно убывает, р-углубляется, а доза характеризуемая кривой распределения,

легирования Q первой стадии примеси) с внешним источником

Рис. 9 Изменение профиля распределения примеси с течением времени при конечном поверхностном источнике.

температуры, обеспечивающий средней секции рабочую температуру до 1250°C с высокой точностью (до $\pm 0,25^\circ\text{C}$). Именно в этой части камеры на кварцевом (или керамическом) держателе 3 располагаются обрабатываемые пластины 4, имеющие на рабочей поверхности оксидную маску. При выполнении загонки примеси или одностадийного процесса диффузии в камеру из внешнего источника непрерывно подаётся диффузант, представляющий смесь легирующей примеси (акцептор бор или донор фосфор) с транспортирующим газом (аргон).

При разгонке примеси в двухстадийном процессе в камеру непрерывно подаётся только аргон, поддерживающий чистоту рабочей зоны. Побочные продукты процесса на выходе собираются специальными сборниками.

В зависимости от диаметра одновременно может обрабатываться до трёх десятков пластин. Технические характеристики диффузионной однозонной печи СДО-125/3-12 следующие:

Количество технологических труб, шт.	3
Диапазон рабочих температур, °C	700-1250
Диаметр рабочей трубы, мм	120
Диаметр обрабатываемых пластин, мм	до 80
Минимальная длина рабочей зоны (мм) с неравномерностью распределения температуры, °C $\pm 0,25$ $\pm 0,5$	450 600
Стабильность поддержания температуры в пределах рабочей зоны, °C	$\pm 0,25$
Воспроизводимость температурного уровня, °C	$\pm 0,5$
Время выхода печи на максимальную рабочую температуру, ч	2
Максимальная мощность, потребляемая в установившемся режиме, кВт	18
Размеры, мм	1852X630X2150
Масса, кг	800

6.7. Расчет режимов термической диффузии.

Вследствие того, что функции распределения носят приближённый характер, а коэффициент диффузии непостоянен по глубине кристалла, изложенная ниже методика расчёта режимов даёт лишь ориентировочное значение времени ведения процесса. По результатам контроля опытных образцов это время корректируется.

6.7.1. Двухстадийный процесс.

Рассматривая Гауссово распределение (5) на поверхности ($X=0$) и на дне формируемого слоя ($X=X_n$), можно получить выражение, связывающее режимы процесса (произведение $D_p t_p$) с заданными параметрами слоя (X_n , N_0 , $N_{исх}$):

$$D_p t_p = \frac{X_n^2}{4 \ln \left(\frac{N_0}{N_{исх}} \right)} \quad (7)$$

Порядок проектирования режимов двухстадийного процесса следующий:

1. По формуле (7) вычисляется произведение $D_p t_p$.
2. Задается поверхностная концентрация примеси для этапа загонки, $N_0 < N < N_{пред}$. Для бора (акцептор) $N_{пред} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, для фосфора (донор) $N_{пред} = 8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.
3. Задается температура загонки t_p° из диапазона $1000 \div 1200^\circ\text{C}$.
4. По графику зависимости $D = f(t^\circ, N_0, N_{исх})$ определяется D_p .
5. Вычисляется время разгонки t_p по результату п.1.
6. По выражению (5) при $X=0$ вычисляется необходимая доза легирования

$$Q = N_s \sqrt{\pi D_p t_p}$$

$$D_3 t_3 = \left(\frac{\sqrt{\pi} Q}{2 \cdot N_{oi}} \right)^2$$

7. По выражению (6) вычисляется произведение
8. Задается температура загонки t_3° из диапазона $800 \div 1000^\circ\text{C}$.
9. По графику зависимости $D = f(t^\circ, N_0, N_{исх})$ определяется D_3 .
10. Вычисляется время загонки t_3 по результату п.7.

Итак, параметрами двухстадийного процесса являются N_0 , t_3° , t_3 , t_p° и t_p .

6.7.2. Одностадийный процесс.

Рассматривая распределение примеси по закону дополнения функции ошибок (выражение 4) на дне формируемого слоя ($X = X_n$), можно получить выражение, связывающее режимы процесса (Dt) с заданными параметрами (X_n , N_0 , $N_{исх}$):

$$\operatorname{erfc} \left(\frac{X_n}{2\sqrt{Dt}} \right) = N_0 / N_{исх} \quad (8)$$

Порядок проектирования режимов одностадийного процесса следующий:

1. Задается $N_0 = N_{пред}$.
2. Вычисляется $N_0 / N_{исх}$.
3. По результату п.2 с помощью таблицы $\operatorname{erfc} V$ определяется значение аргумента V .

$$Dt = \left(\frac{X_n}{2V} \right)^2$$

4. Вычисляется (по выражению 8)
5. Задается температура процесса из диапазона $1000 \div 1200^\circ\text{C}$.
6. По графику зависимости $D = f(t^\circ, N_0, N_{исх})$ определяется D .
7. Вычисляется время процесса по результату п.4

Итак, параметрами одностадийного процесса являются N_0 , t° и t .

7. Легирование методом ионной имплантации.

7.1. Сущность и особенности процесса.

7.2. Функция распределения концентрации примеси по глубине и технологические режимы.

7.3. Рабочая камера установки ионной имплантации.

7.4. Расчет режимов ионной имплантации.

7.1. Сущность и особенности процесса.

При ионной имплантации атомы легирующей примеси ионизируют в сильном электрическом поле и облучают потоком ионов поверхность пластины с подготовленной заранее оксидной маской (рис. 11). Имея при подлёте к поверхности одинаковую энергию, ионы при вхождении в кремний испытывают многократные столкновения с ядрами и кулоновское взаимодействие с электронами атомов кремния. Это приводит к постепенному торможению ионов вплоть до полной остановки. Путь, пройденный отдельным ионом в кристалле кремния (длина пробега), является величиной случайной и для совокупности ионов, внедрённых в кристалл, оценивается средним значением пробегов $\lambda_{\text{ср}}$.

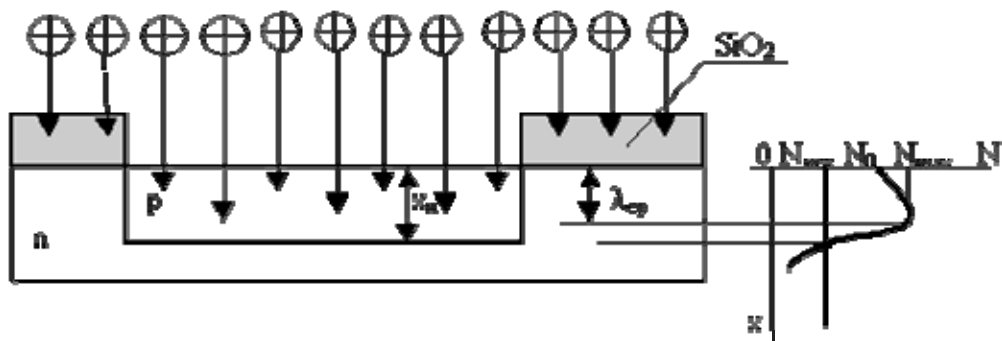


Рис 11. Принцип легирования ионной имплантацией.

Разброс отдельных пробегов относительно среднего значения оценивается средним квадратическим отклонением σ .

Параметры распределения пробегов $\lambda_{\text{ср}}$ и σ зависят от энергии ионов E , а также от эффективного диаметра атома примеси (иначе говоря от порядкового номера z в периодической системе элементов). Чем выше E и меньше z , тем больше $\lambda_{\text{ср}}$ и σ (таблица 2).

В материале оксидной маски (SiO_2), имеющей более плотную структуру по сравнению с кремнием, имеет место более сильное торможение ионов, благодаря чему лишь незначительное количество ионов пронизывает маску и внедряются в кремний. За счёт этого достигается избирательность легирования. При энергиях десятки и сотни килоэлектронвольт ион способен при столкновении с ядрами кремния вызывать массовые смещения атомов в междоузлия решётки. В результате нарушения структуры монокристалла большое количество внедрённой примеси оказывается пассивной, неспособной создавать подвижные носители заряда, а активная часть примеси создаёт носители с низкой подвижностью. Для восстановления нарушенного слоя и перевода всей внедрённой примеси в активное состояние прибегают к отжигу поверхностного слоя

путём облучения коротким (порядка 1 мс) и мощным импульсом инфракрасного излучения.

Таблица 2. Параметры распределения ионов легирующих элементов в кремнии при ионной имплантации (E [кэВ], $\lambda_{\text{ср}}$ [нм], σ [нм]).

E	B (z=5)		Al (z=13)		P (z=15)		As (z=33)	
	$\lambda_{\text{ср}}$	σ	$\lambda_{\text{ср}}$	σ	$\lambda_{\text{ср}}$	σ	$\lambda_{\text{ср}}$	σ
1	4	4	4	2	3	2	4	1
3	11	7	7	4	7	4	6	2
5	17	11	9	5	9	5	9	3
10	33	18	16	8	15	8	13	5
20	65	29	29	14	26	12	19	7
30	97	38	42	19	37	17	25	9
40	129	46	56	24	49	21	30	11
50	159	52	70	29	61	26	35	13
60	188	57	84	34	73	30	40	15
70	216	62	99	38	86	34	45	16
80	244	66	113	43	98	38	51	18
100	296	73	143	51	124	46	61	21
120	346	79	173	58	150	53	71	25
140	394	84	202	65	176	60	82	28
160	439	89	232	72	202	66	92	31
180	483	92	262	78	229	72	103	35
200	525	96	291	84	255	78	114	38
220	566	99	320	89	281	84	125	41
240	606	102	349	95	308	88	136	44
260	645	104	377	99	334	94	147	47
280	683	106	406	104	360	99	158	51
300	719	108	434	108	385	103	169	54
350	808	113	502	118	449	114	198	61
400	893	117	568	127	511	123	227	69
500	1053	124	696	142	631	140	285	83
600	1203	129	816	154	746	153	345	96
700	1346	133	931	164	857	165	405	108
800	1484	137	1041	173	963	175	465	120
900	1617	140	1146	180	1066	184	525	132
1000	1747	143	1247	187	1164	192	585	142

Преимущества ионной имплантации по сравнению с термической диффузией примеси сводятся к следующему:

1. Процесс не требует нагрева пластин и, следовательно, не приводит к изменению параметров ранее сформированных слоёв (за счёт диффузионной разгонки).
2. Так как ионный пучок перпендикулярен к пластине, размеры легированной области точно соответствуют размерам окна в оксидной маске.
3. Количество введённой примеси точно дозируется (контролируется в процессе облучения).

Недостатком процесса ионной имплантации является то, что при постоянной энергии ионов невозможно получить глубоко залегающий переход с одновременным

присутствием примеси на поверхности. В связи с этим на практике прибегают к одному из двух вариантов (рис. 12):

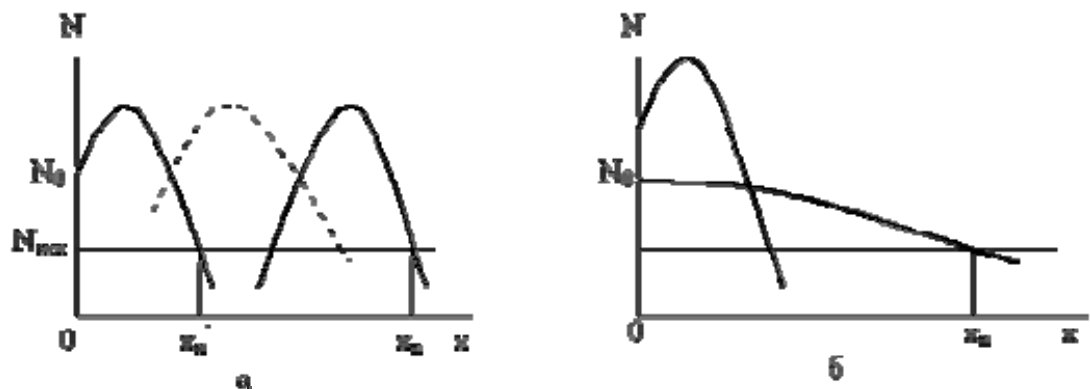


Рис. 12. Формирование глубоких профилей: а - ступенчатый процесс; б - комбинирование имплантационной загонки с диффузионной разгонкой

1. Ступенчатый процесс. Непрерывное и глубокое распределение примеси от поверхности до перехода обеспечивается несколькими ступенями легирования при различных энергиях, причём первый (глубокий) профиль обеспечивает заданную глубину залегания р-п-перехода X_n , а последний (у поверхности) - необходимую поверхностную концентрацию N_0 (рис. 12,а).
2. Комбинированный процесс. Имплантационная загонка примеси при низкой энергии обеспечивает необходимую дозу легирования Q и присутствие примеси на поверхности, а диффузионная разгонка - заданную глубину залегания р-п-перехода X_n (рис. 6.12,б).

7.2. Функция распределения концентрации примеси по глубине и технологические режимы.

Если направление ионного потока не совпадает с главными кристаллографическими направлениями в монокристалле кремния, то распределение примеси по глубине подчиняется гауссову закону:

$$N = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x-\lambda_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2} \quad (9)$$

Из выражения (9) нетрудно получить формулы для N_0 (при $X=0$), N_{max} (при $X=\lambda_{cp}$) и $N_{исх}$ (при $X=X_n$):

$$N_0 = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\lambda_{cp}^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

$$N_{max} = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (11)$$

$$N_{исх} = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{X_n - \lambda_{ср}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2} \quad (12)$$

Из (11) и (12) можно получить

$$X_n = \lambda_{ср} \pm \sigma \sqrt{2 \ln \left(N_{max} / N_{исх} \right)} \quad (13)$$

а из (10) - условие, при котором поверхностная концентрация будет не менее заданной величины N_0

$$\lambda_{ср} / \sigma \leq \sqrt{2 \ln \left(N_{max} / N_0 \right)} \quad (14)$$

Знаки "±" в формуле (13) отражают тот факт, что если профиль распределения лежит достаточно глубоко, то образуются два перехода (скрытый слой).

Выражения (11), (13), (14) используются при расчёте режимов имплантации. К ним относят: кратность ионизации атомов примеси n (иначе говоря, число единичных зарядов, которые несёт ион), ускоряющее напряжение $U_{уск}$ [кВ] и доза легирования Q [см⁻²].

Первые два параметра связаны с энергией E [кэВ] простым соотношением:

$$E = n U_{уск} \quad (15)$$

Доза легирования:

$$Q = \frac{Jt}{qn} \quad (16)$$

где J - плотность ионного тока [А/см²], t - время облучения [с], q - заряд электрона ($1,6 \times 10^{19}$ Кл).

Из выражений (15) и (16) следует, что повышение кратности ионизации до 2 или 3 уменьшает необходимое ускоряющее напряжение для достижения необходимой энергии, но в то же время увеличивает длительность облучения (или плотность ионного тока) для достижения необходимой дозы легирования. Кроме того, получение потока 2^x - или 3^x -зарядных ионов требует повышения мощности, подводимой к разрядной камере установки. Таким образом, повышение кратности ионизации оправдано лишь в том случае, если рассчитанное при $n=1$ ускоряющее напряжение превышает возможности установки.

7.3. Рабочая камера установки ионной имплантации.

Установка ионной имплантации представляет собой вакуумную камеру, состоящую из ряда блоков, последовательно состыкованных с помощью уплотнений из вакуумной резины. Из источника примесь в парообразном или газообразном виде попадает в разрядный блок (ионизатор), из которого отрицательным потенциалом в 20...25 кВ ионы вытягиваются в магнитный сепаратор (масс-анализатор). Здесь в постоянном магнитном поле происходит разделение траекторий ионов с различным электрическим зарядом так, что в следующий блок проходит моноэнергетический поток ионов (с расчётным

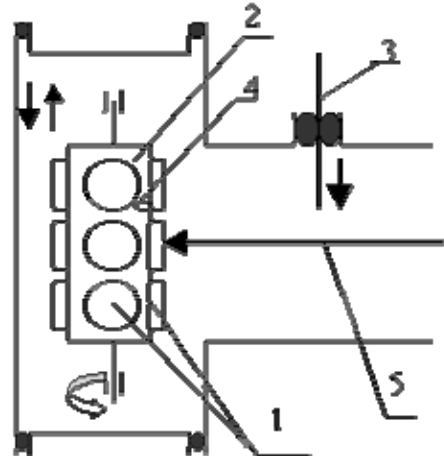


Рис. 13 Схема рабочей камеры установки ионной имплантации

значением n). В этом блоке с помощью системы электродов ионному пучку придаётся плоская (ленточная) форма и в следующем блоке (ускорителе) ионы разгоняются до необходимой энергии. В рабочую камеру, таким образом, проходит плоский (ленточный) ионный луч, неподвижный в пространстве.

Схема рабочей камеры (последнего блока установки) приведена на рис. 13. Облучаемые пластины 1, несущие оксидную маску, размещаются по периферии держателя (контейнера) 2 в несколько ярусов. В процессе облучения пластин неподвижным ленточным лучом 5 контейнер вращается и совершает возвратно-поступательное движение. Пластины, таким образом, постепенно набирают необходимую дозу легирования. Между пластинами располагаются датчики 4, принимающие ту же дозу

заряда, что и пластины. По достижении необходимой дозы ($Q = \int j dt$) системой контроля вырабатывается сигнал, отключающий ионный луч.

Перед выгрузкой контейнера с обработанными пластинами вакуумный затвор 3 отсекает рабочую камеру от остального объёма установки, камеру открывают и производят замену контейнера с пластинами. После закрытия камеры и открывания затвора вакуумные насосы восстанавливают рабочее давление (примерно 10^{-4} Па) в объёме установки и начинается следующий цикл обработки.

Технические характеристики установки ионной имплантации "Везувий-9" следующие:

Тип разрядной камеры	магнетронный
Максимальный ток разряда, А	5
Максимальное напряжение разряда, В	500
Напряжение экстракции ионов, кВ	25
Напряженность магнитного поля масс-сепаратора, А/м	$24 \cdot 10^4$
Угол поворота ионного пучка, град	110
Радиус равновесной траектории, м	0,3
Максимальный ионный ток, мкА:	
Для 2 ⁺ -зарядных ионов	600
Для 3 ⁺ -зарядных ионов	150
Максимальное ускоряющее напряжение, кВ	600
Количество пластин, обрабатываемых в одном цикле, шт., при диаметре пластин:	
75мм	54
100мм	36
Скорость движения контейнера с пластинами:	
Вращательного, об/мин.	20
Возвратно-поступательного, цикл/мин.	6
Предельный вакуум в рабочем объёме установки, Па	$6,5 \cdot 10^{-4}$

7.4. Расчет режимов ионной имплантации.

Наиболее полный набор задач расчёта режимов даёт вариант ступенчатой имплантации. В этом случае расчёт состоит из трёх этапов (см. рис. 12,а):

1. Расчет режимов первой (глубокой) ступени имплантации, имеющей целью сформировать р-п-переход на заданной глубине X_n при заданных максимальной N_{max} и исходной $N_{исх}$ концентрациях.
2. Расчет режимов для последней (приповерхностной) ступени, имеющий целью обеспечить поверхностную концентрацию не ниже заданной N_0 (при тех же значениях N_{max} и $N_{исх}$). Ограничение N_0 снизу связано с необходимостью получения омического контакта к слою. (При низких, порядка 10^{17} см^{-3} , значениях N_0 возникает потенциальный барьер - барьер Шоттки).
3. Расчет режимов для промежуточных ступеней, имеющих целью формирование непрерывного легированного слоя от поверхности до р-п-перехода.

Алгоритм расчёта третьего этапа достаточно сложен, поэтому ограничимся рассмотрением алгоритмов расчета первых двух.

Исходными параметрами слоя являются: глубина залегания р-п-перехода X_n , поверхностная концентрация N_0 , исходная концентрация $N_{исх}$ и максимальная концентрация N_{max} . Следует подчеркнуть, что в отличие от диффузионной области, ограниченной р-п-переходом, имплантированная область имеет плавный переход только в донной части. "Стенки" области представляют ступенчатый р-п-переход, на котором пробивное напряжение минимально на глубине λ_{cp} . Поэтому разработчик структуры ограничивает величину N_{max} сверху

Для первой (глубокой) ступени расчёт сводится к следующему:

1. Подобрать значения λ_{cp} и σ , удовлетворяющие равенству (13).
2. По значениям λ_{cp} и σ для выбранного легирующего элемента из табл. 2. определить необходимую энергию E [кэВ].
3. По выражению (15) при минимально необходимом значении n (1,2 или 3) вычислить ускоряющее напряжение $U_{уск}$ [кВ].
4. По выражению (11) вычислить необходимую дозу легирования Q [см^{-2}]

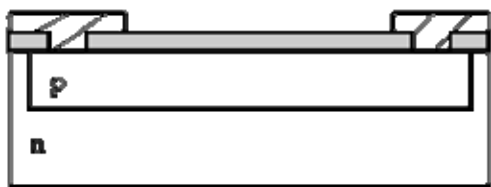
Для последней (приповерхностной) ступени:

1. По выражению (14) вычислить отношение λ_{cp}/σ .
2. Из табл. 2 найти значения, λ_{cp} и σ , дающие отношение, возможно более близкое к вычисленному.
3. Установить по табл. 2 соответствующее значение энергии E .
4. По выражению (15) вычислить $U_{уск}$.
5. По выражению (11) вычислить Q

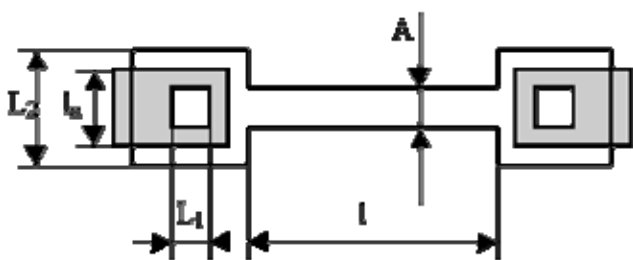
Если в структуре ИМС предусмотрены высокоомные имплантированные резисторы, формируемые одновременно с последней ступенью, то для проектирования их топологии необходимо знать глубину залегания X_n р-п-перехода, который образуется последней ступенью (см. рис. 12,а). Эта глубина рассчитывается по выражению (13) с подстановкой λ_{cp} и σ для последней ступени.

Проектирование полупроводниковых резисторов в ИМС.

Структура и топология резистора, сформированного в полупроводниковом материале, приведены на рис. 15. Сопротивление резистора складывается из сопротивления линейной части, которое подчиняется выражению $R = R_{cl} \times \ell / a$, и сопротивления приконтактных



областей, которое определяется через эмпирический коэффициент k , выраженный в долях $R_{сч}$.



$$R = R \cdot \frac{\ell}{a} + 2 \cdot R_{сч} \cdot k \quad (35)$$

Рис. 15 Структура (а) и номотопия (б) полупроводникового резистора.

Коэффициент k зависит от формы и размеров приконтактной области и ширины a линейной части резистора. Он определяется по номограммам, приведенным в табл. 3. Размер a должен быть минимально возможным, но следует учитывать, однако, возможности технологии и требования точности сопротивления (с уменьшением

ширины точность уменьшается).

Для расчета минимальных размеров приконтактных областей используются правила, изложенные в разделе 12. Подробные сведения о расчете резисторов читатель может найти в []. После определения a и k по выражению (35) определяют длину ℓ линейной части резистора. Для формирования резисторов могут быть использованы любые слои физической структуры ИМС. В практике проектирования и производства находят применения резисторы на основе эмиттерного слоя (сопротивления в несколько десятков Ом), базового слоя (от сотен до нескольких тысяч Ом), слоя активной базы (десятки тысяч Ом, так называемые "ПИНЧ-резисторы").

Фотолитография.

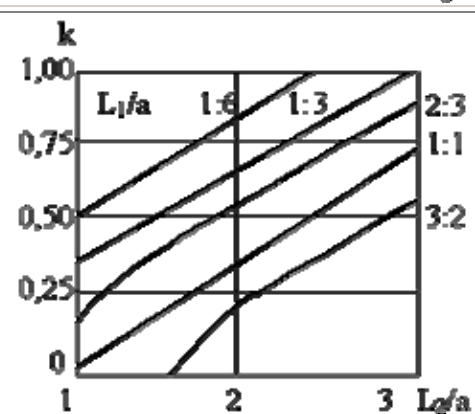
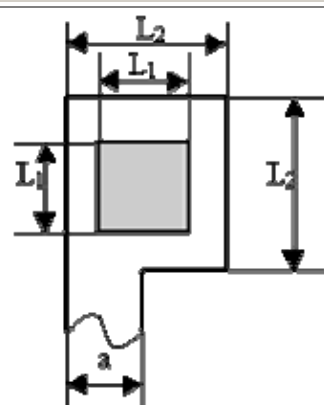
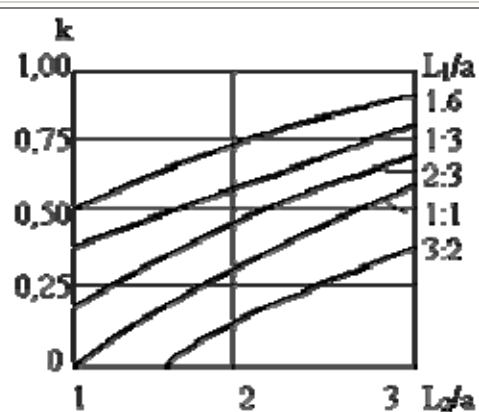
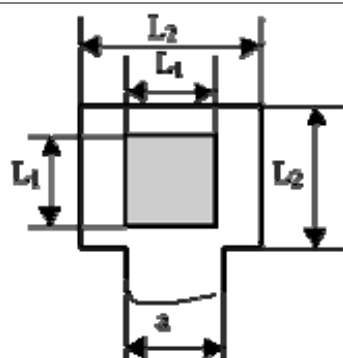
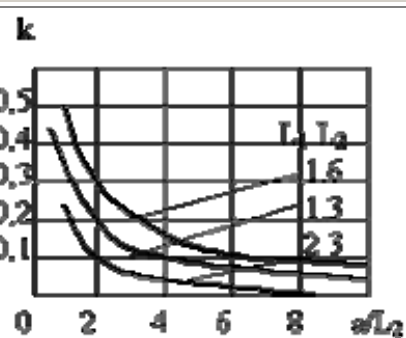
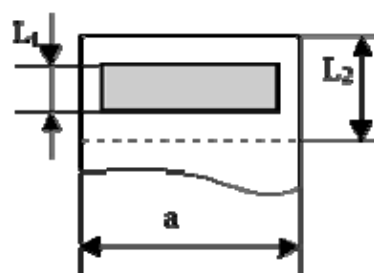
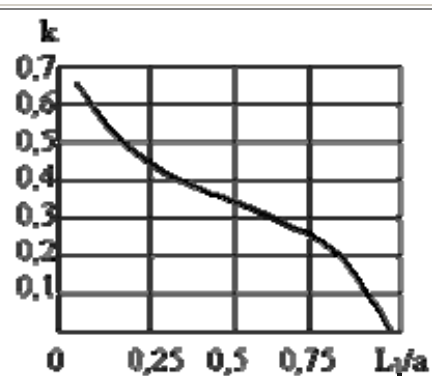
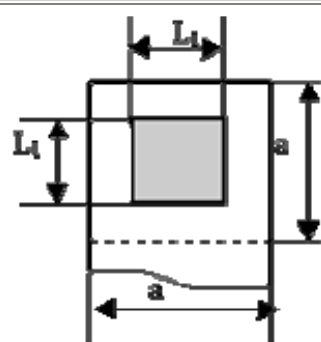
Процессы легирования, а также наращивания слоёв различных материалов призваны сформировать вертикальную физическую структуру ИМС. Необходимые форма и размеры элементов и областей в каждом слое структуры обеспечиваются процессом фотолитографии.

Фотолитография - процесс избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитной *фотомаски*.

На рис. 16 приведена укрупнённая структурная схема процесса фотолитографии. Отдельные этапы на схеме включают в себя несколько операций. Ниже в качестве примера приведено описание основных операций при избирательном травлении оксида кремния (SiO_2), которое используется многократно и имеет целью создание окон под избирательное легирование, а также контактных окон.

Таблица 3. Формы приконтактных областей полупроводниковых резисторов и номограммы для определения коэффициента k .

Топология приконтактных областей полупроводниковых резисторов	Номограммы для определения коэффициента k .
---	---



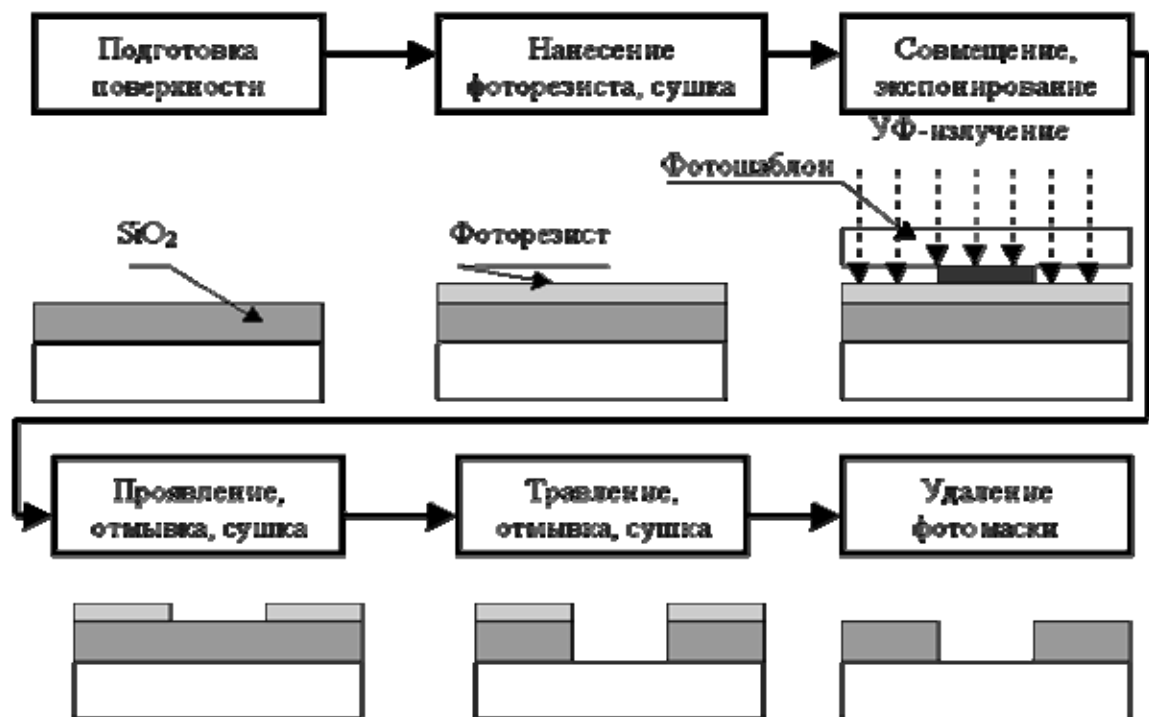


Рис. 16. Укрупненная схема процесса фотолитографии.

[11.1. Подготовка поверхности.](#)

[11.2. Нанесение фотослоя.](#)

[11.3. Совмещение и экспонирование.](#)

[11.4. Проявление.](#)

[11.5. Травление.](#)

11.1. Подготовка поверхности.

Подготовка поверхности к нанесению фотослоя заключается в её обработке парами органического растворителя для растворения жировых плёнок, которые препятствуют последующему сцеплению фоторезиста с поверхностью. Отмывка сверхчистой (деионизованной) водой удаляет следы растворителя; а также микрочастицы, способные впоследствии образовать "проколы" в тонком (≈ 1 мкм) слое фоторезиста.

11.2. Нанесение фотослоя.

При нанесении фотослоя используется раствор светочувствительного полимера в органическом растворителе (фоторезист). Для получения тонких слоёв фоторезиста на поверхности пластины его вязкость должна быть очень мала, что достигается высоким содержанием растворителя (80-95 % по массе). В свою очередь, с уменьшением толщины фотослоя повышается разрешающая способность фотолитографического процесса. Однако, при толщинах менее 0,5 мкм плотность дефектов ("проколов") в фотослое резко возрастает, и защитные свойства фотомаски снижаются.

Нанесение фотослоя может быть выполнено одним из двух способов:

центрифугированием или *распылением аэрозоля*. В случае использования центрифуги дозированное количество фоторезиста подаётся в центр пластины, прижатой вакуумом к вращающейся платформе (центрифуге). Жидкий фоторезист растекается от центра к периферии, а центробежные силы равномерно распределяют его по поверхности пластины, сбрасывая излишки в специальный кожух. Толщина **h** нанесённой плёнки

зависит от скорости вращения платформы ω , от вязкости фоторезиста ν и определяется соотношением:

$$h = k \sqrt{\nu / \omega} \quad (36)$$

где k - коэффициент, устанавливаемый экспериментально.

Скорость вращения центрифуги около 6000 об/мин, толщина фотослоя регулируются подбором соответствующей вязкости, т.е. содержанием растворителя.

Для центрифугирования характерны следующие недостатки:

1. Трудность получения относительно толстых (в несколько микрон) и равномерных плёнок из-за плохой растекаемости вязкого фоторезиста.
2. Напряжённое состояние нанесённой плёнки, что приводит на этапе проявления к релаксации участков фотомаски и изменению их размеров.
3. Наличие краевого утолщения как следствие повышения вязкости в процессе выравнивания, что ухудшает контакт фотошаблона с фотослоем.
4. Трудность организации одновременной обработки нескольких пластин.

При распылении аэрозоли фоторезист подаётся из форсунки на пластины, лежащие на столе, совершающем возвратно-поступательное движение. Необходимая толщина формируется постепенно. Отдельные мельчайшие частицы растекаются и, сливаясь, образуют сплошной слой. При следующем проходе частицы приходят на частично просохший слой, несколько растворяя его. Поэтому время обработки, которое зависит от вязкости, расхода и "факела" фоторезиста, от скорости движения стола и расстояния от форсунки до подложки, устанавливается экспериментально. При реверсировании стола крайние пластины получают большую дозу фоторезиста, чем центральные. Во избежание утолщения слоя на крайних пластинах форсунке также сообщается возвратно-поступательное вертикальное движение (синхронно с движением стола). При торможении стола в конце хода форсунка поднимается вверх и плотность потока частиц в плоскости пластин снижается.

Технические характеристики установки нанесения фоторезиста центрифугированием типа АФФ-2 следующие:

Диаметр обрабатываемых пластин, мм	60 и 75
Шаг расположения пластин на патроне, мм	9,5
Производительность, пластин/ч	500
Частота вращения центрифуги, об/мин:	
в режиме растекания фоторезиста	60—600
в режиме формирования пленки	600—6000
Время центрифугирования, с:	
в режиме растекания фоторезиста	1—10
в режиме формирования пленки	10—60
Температура в термокамере, °С	(80—180)±5
Время нагрева, мин	2—30
Давление рабочего газа в термокамере, Па	(4+6)·10 ⁵
Давление в форвакуумной магистрали, Па	≤10 ⁴
Расход сжатого воздуха, м ³ /ч	≤1
Расход воды, л/ч	≤100
Максимальная потребляемая мощность, кВт	5
Размеры, мм	2800X1000X2500
Масса, кг	900

Технические характеристики полуавтомата нанесения фоторезиста распылением следующие:

Производительность, пластин/ч	до 500
Число одновременно обрабатываемых пластин	до 15
Скорость перемещения, мм/с:	
Форсунки	100—150
Стола	10—25
Напряжение питания, В	380 (50 Гц)
Потребляемая мощность, кВт	2
Размеры, мм	1000X1800X1200
Масса, кг	430

Распыление аэрозоли лишено недостатков центрифугирования, допускает групповую обработку пластин, но предъявляет более жёсткие требования к чистоте (отсутствие пыли) окружающей атмосферы. Нанесение фоторезиста и последующая сушка фотослоя являются весьма ответственными операциями, в значительной степени определяющими процент выхода годных микросхем.

Пылевидные частицы из окружающего воздуха могут проникать в наносимый слой и создавать микродефекты. Нанесение фотослоя должно выполняться в условиях высокой обеспыленности в рабочих объёмах (боксах, скафандрах) 1 класса с соблюдением следующей нормы: в 1 литре воздуха должно содержаться не более четырёх частиц размером не более 0,5 мкм.

При сушке нанесённого слоя в слое могут сохраниться пузырьки растворителя, а при выходе на поверхность слоя они могут образовать микротрещины. Поэтому сушка выполняется с помощью источников инфракрасного излучения, для которого фоторезист является прозрачным, а, следовательно, поглощение излучения с выделением тепла происходит на границе " пластина - фоторезист ". Следовательно, сушка протекает от нижних слоёв фоторезиста к верхним, обеспечивая свободное испарение растворителя. Во

избежание преждевременной полимеризации (задубления) фоторезиста и потери им чувствительности температура сушки должна быть умеренной ($\approx 100 \div 120^\circ\text{C}$).

Перечисленные виды дефектов фотослоя (пылевидные частицы, микропузырьки и микротрещины) сохраняются в фотомаске и наследуются оксидной маской, создавая в ней микроотверстия. При использовании оксидной маски для избирательного легирования примесь будет проникать через них, образуя легированные микрообласти и, как следствие, токи утечки и пробой в р-п-переходах. Если оксидная маска представляет собой слой контактных окон, то металл, проникая в микроотверстия, может привести к паразитным связям между областями и коротким замыканиям. Характеристики некоторых марок фоторезистов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры некоторых типов фоторезистов

Марка фото-резиста	Тип	Разрешающая способность, лин/мм, при толщине слоя 1 мкм	Цвет
ФП-383	Позитивный	400	Оранжевый
ФП-617П	Позитивный	500	Темно-коричневый
ФН-106	Негативный	200	Желтый
ФН-108	Негативный	400	Оранжевый

11.3. Совмещение и экспонирование.

Под совмещением перед экспонированием понимается точная ориентация фотошаблона относительно пластины, при которой элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимают положение относительно элементов предыдущего слоя (в пластине), предписанное разработчиком топологии. Например, фотошаблон, несущий рисунок эмиттерных областей должен быть точно ориентирован относительно пластины, в которой уже сформированы базовые области.

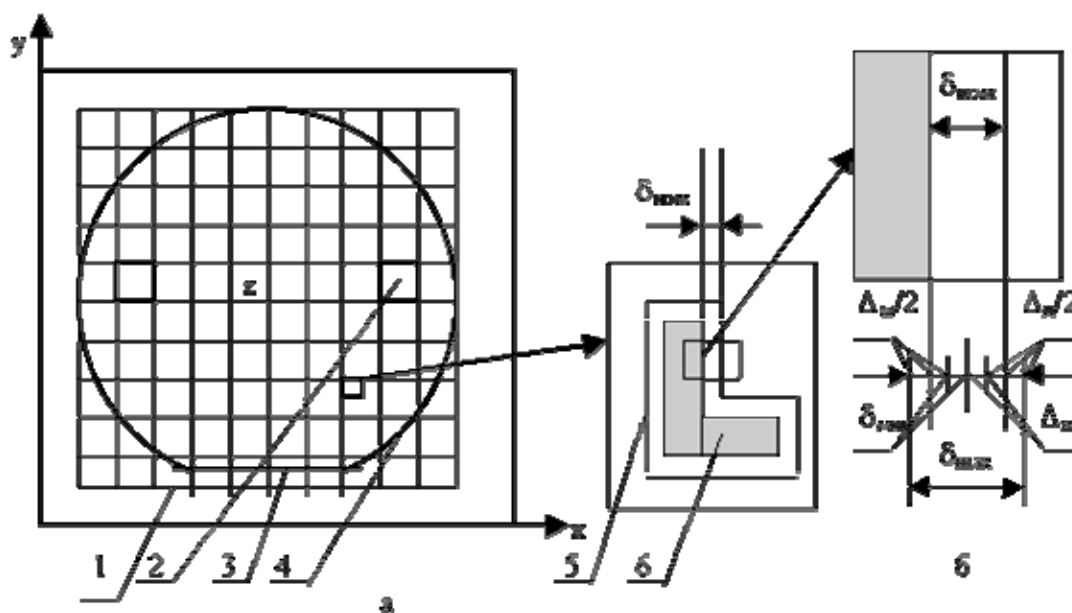


Рис. 17. Совмещение фотошаблона с пластиной: а - общая схема совмещения: 1 - групповой фотошаблон; 2 - модули для грубого совмещения; 3 - базовый срез на пластине для предварительной ориентации; 4 - групповая пластина; 5 - знак совмещения в модуле

пластины; δ - знак совмещения в модуле шаблона; δ - схема для расчета номинального зазора между знаками совмещения.

Процесс совмещения включает три этапа (рис. 17,а):

1. Предварительная ориентация по базовому срезу, обеспечивающую на границах модулей групповой пластины наивыгоднейшую кристаллографическую плоскость с точки зрения качества разделения пластины на отдельные кристаллы.
2. Предварительное грубое совмещение по границам крайних модулей, имеющее целью исключить разворот пластины и фотошаблона относительно вертикальной оси Z.
3. Точное совмещение, исключающее смещение рисунков фотошаблона и пластины по осям X и Y.

Для точного совмещения используют специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоёв. Совмещение считается выполненным, если при введении одного знака внутрь другого по всему контуру просматривается зазор.

Номинальным зазором называется равномерный по всему контуру зазор, который образуется при номинальных (проектируемых) размерах знаков и их точном совмещении (центрировании). Из рис. 17,б следует, что

$$\delta_{\text{ном}} = \delta_{\text{мин}} + \Delta_{\text{ш}} + (\Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{п}}) / 2 \quad (37)$$

где $\delta_{\text{мин}} = 200/\Gamma$ - предельное разрешение системы "глаз - микроскоп" (200 мкм - линейное разрешение нормального глаза; Γ - кратность увеличения микроскопа); $\Delta_{\text{ш}}$ - абсолютная предельная погрешность фиксации изображения на установке совмещения и экспонирования; $\Delta_{\text{ш}}$ и $\Delta_{\text{п}}$ - абсолютная предельная погрешность размера знака соответственно на шаблоне и пластине ($\Delta_{\text{ш}} < \Delta_{\text{п}}$);

Таким образом, в зависимости от фактических значений случайных погрешностей, реальный зазор может колебаться в пределах от $\delta_{\text{макс}}$ до $\delta_{\text{мин}}$, а абсолютная предельная погрешность совмещения $\Delta_{\text{с}}$ для контролируемого модуля групповой пластины:

$$\Delta_{\text{с}} = \delta_{\text{макс}} - \delta_{\text{мин}} = \Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{п}} + \Delta_{\text{с}} \quad (38)$$

Для совокупности модулей в партии групповых пластин:

$$\Delta_{\text{с}} = \Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{п}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{доб}} \quad (39)$$

где $\Delta_{\text{т}}$ - абсолютная предельная погрешность шага расположения модулей на групповом фотошаблоне; $\Delta_{\text{доб}}$ - дополнительное расширение зазора, которое может предусматриваться для снижения зрительного напряжения оператора.

Погрешность совмещения учитывается при расчёте размеров областей каждого слоя. Обычно фотошаблон очередного слоя совмещается с предыдущим (по ходу технологического процесса) слоем, уже сформированном на пластине. В частности, слой контактных окон совмещается с эмиттерным слоем, а слой металлизации - со слоем

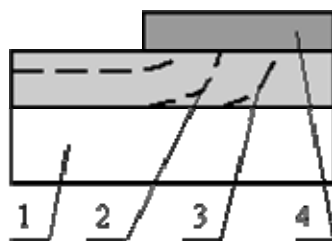


Рис. 18. Боковое подтравливание под фотомаску: 1 – пластина; 2 – фронт травления при нормальном режиме; 3 – фронт травления при «перетравливании»; 4 – фотомаска.

контактных окон. Поскольку контактные окна и металлические контакты формируются одновременно для всех областей структуры, погрешность совмещения накапливается и для эмиттерных областей входит в размер величиной $4\Delta_c$, для базовых областей - $6\Delta_c$, для коллекторных - $8\Delta_c$. Поэтому совершенствование процессов литографии (уменьшение $\Delta_{ш}$ и $\Delta_{п}$) и применяемого оборудования ($\Delta_{и}$ и $\Delta_{т}$) является важной и постоянной задачей конструкторов и технологов. Влияние погрешности совмещения на размеры областей рассмотрено ниже на примере расчёта размеров эмиттерной области транзистора.

После выполнения совмещения микроскоп отводится, а на его место подводится осветитель, жёстко связанный с микроскопом на каретке (или поворотной турели). Оператор включает осветитель одновременно с реле времени, которое контролирует время экспонирования.

11.4. Проявление.

Проявление скрытого изображения для негативных фоторезистов заключается в обработке фотослоя органическим растворителем. При этом участки, не подвергшиеся облучению, растворяются, а облучённые участки, где при поглощении ультрафиолетового излучения происходит разрыв межмолекулярных связей и перестройка структуры (фотополимеризация), сохраняются (см. рис. 16).

В позитивных фоторезистах на участках, подвергшихся облучению, происходит разрушение структуры (деструкция) с образованием кислоты. Для перевода её в растворимые слои применяют раствор неорганического соединения со щелочными свойствами (KOH, NaOH и др).

После отмывки от следов проявителя и сушки полученную фотомаску подвергают тепловому задубливанию ($120\div 180^\circ\text{C}$ в зависимости от марки фоторезиста), в результате чего окончательно формируются её защитные свойства.

11.5. Травление.

При травлении в жидких травителях используются водные растворы неорганических соединений (обычно кислот). Химический состав и концентрация травителя в растворе подбирается так, чтобы поверхностный слой растворялся активно, а нижележащий не растворялся. С травлением в жидких травителях связано не только явление подтравливания под фотомаску, но и разброс величины подтравливания в совокупности элементов одного слоя.

К моменту окончания растворения слоя в "окне" фотомаски боковое травление оказывается примерно равным толщине слоя (рис. 18), однако момент окончания травления зависит от размеров вытравливаемого элемента (окна в маске). В процессе травления имеют место отвод продуктов химической реакции от поверхности в раствор и подвод из раствора свежего травителя. Оба процесса протекают благодаря взаимодиффузии, скоростью которой и определяет скорость травления. В мелких элементах массообмен затруднён и скорость травления ниже, чем в крупных элементах. Поскольку технологическое время травления устанавливают по самому мелкому элементу, более крупные элементы получают "перетрав", т.е. большие погрешности размера.

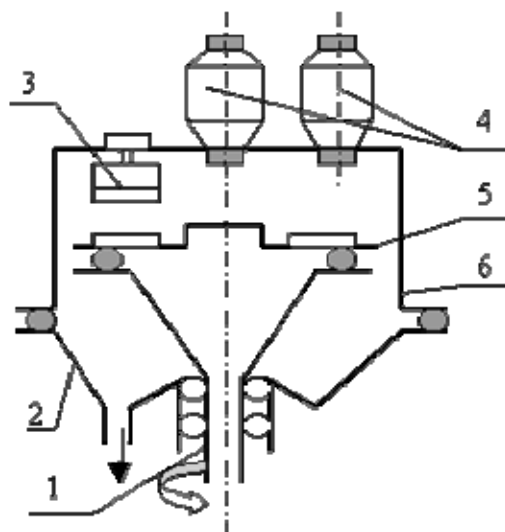


Рис. 19 Схема установки травления, отмывки и сушки: 1 – вал с лопастями; 2 – дно камеры с отверстием; 3 – форсунка сушки; 4 – форсунки травления и отмывки; 5 – платформа с пластиной-матрицей; 6 – съёмная крышка.

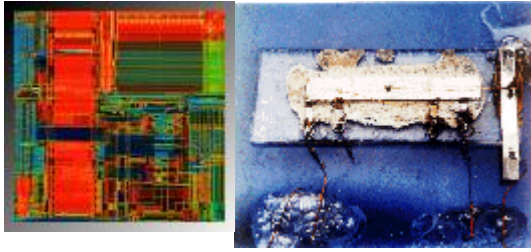
Для повышения точности травления, т.е. уменьшения разброса размеров элементов из-за растрыва, необходимо динамическое воздействие травителя на обрабатываемую поверхность. На рис. 19 приведена схема установки на основе центрифуги, снабжённой тремя форсунками для последовательного травления, отмывки (деионизированной водой) и сушки (подогретым воздухом). Форсунка для травителя обеспечивает ускоренную подачу свежего травителя к поверхности, вытесняя продукты реакции, а центробежные силы ускоряют отвод отработанного травителя. В табл. 5 приведены применяемые при производстве интегральных микросхем типы травителей.

Таблица 5. Травители для некоторых материалов.

Ag— г.к. H_2SO_4 , HNO_3	Pt— “царская водка”
Al— рз. щелочи, г. H_3PO_4	Si— HNO_3+HF
Au— “царская водка” (к $HCl:HNO_3=3:1$)	SiO_2 — рз. HF
Cr— HCl , H_2SO_4 , г. HNO_3	Si_3N_4 — г. H_3PO_4 , к. HF
Cu— г.к. H_2SO_4 , HNO_3	Ta— HF
Mo— г.к. H_2SO_4 , г. HNO_3 , “царская водка”	Ti— щелочи, HF, рз. кислоты
Ni— рз. Кислоты	V— HF, HNO_3 , “царская водка”, г.к. H_2SO_4
Pd— HNO_3 , г.к. H_2SO_4 , “царская водка”	W— “царская водка”, HNO_3+HF

Примечание: к- концентрированная; рз- разбавленная; г- горячая.

Существенное повышение точности травления достигается при использовании вакуум-плазменных ("сухих") методов травления, при которых разрушение слоя происходит механически за счёт бомбардировки потоком заряженных частиц (ионов инертного газа). С этой целью в вакуумной камере при давлении газа $1 \div 10$ Па зажигается разряд и обрабатываемая пластина в качестве катода подвергается обработке ионами с энергией до 1 кэВ. Структура полимерной фотомаски и её толщина сохраняют её защитные свойства до окончания обработки слоя. Поскольку движение ионов инертного газа (обычно аргона) происходит по нормали к поверхности пластины, вытравленные участки точно соответствуют размерам окон фотомаски, т.е. эффект подтравливания отсутствует.



Современные технологии полупроводникового производства

В последние годы к стадии возможности использования в коммерческом производстве подошел целый ряд технологий, позволяющих заметно увеличить скорость работы транзисторов, либо столько же заметно уменьшить размер чипа без перехода на более тонкий технологический процесс. Некоторые из этих технологий уже начали применяться в течение последних месяцев, их названия упоминаются в новостях, относящихся к компьютерам, все чаще. Эта статья – попытка сделать краткий обзор подобных технологий, попытавшись заглянуть в самое ближайшее возможное будущее чипов, находящихся в наших компьютерах.

Первая интегральная схема, где соединения между транзисторами сделаны прямо на подложке, была сделана более 40 лет назад. За это время технология их производства претерпела ряд больших и малых улучшений, пройдя от первой схемы Джека Килби до сегодняшних центральных процессоров, состоящих из десятков миллионов транзисторов, хотя для серверных процессоров в пору уже говорить о сотнях миллионов.

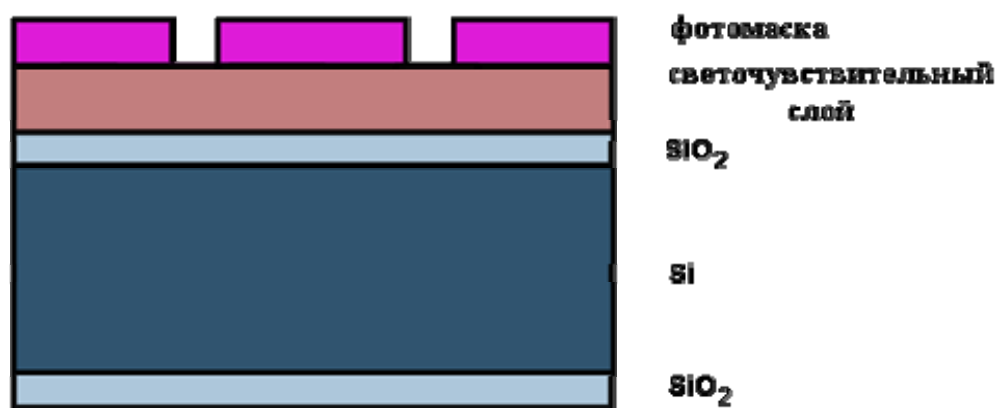
Здесь пойдет речь о некоторых последних технологиях в этой области, таких, как медные проводники в чипах, SiGe, SOI, перовскиты. Но сначала необходимо в общих чертах затронуть традиционный процесс производства чипов из кремниевых пластин. Нет необходимости описывать процесс превращения песка в пластины, поскольку все эти технологии не имеют к столь базовым шагам никакого отношения, поэтому начнем с того, что мы уже имеем кремниевую пластину, диаметр которой на большинстве сегодняшних фабрик, использующих современные технологии, составляет 20 см. Ближайшим шагом на ее превращении в чипы становится процесс окисления ее поверхности, покрытия ее пленкой окислов - SiO_2 , являющейся прекрасным изолятором и защитой поверхности пластины при литографии.



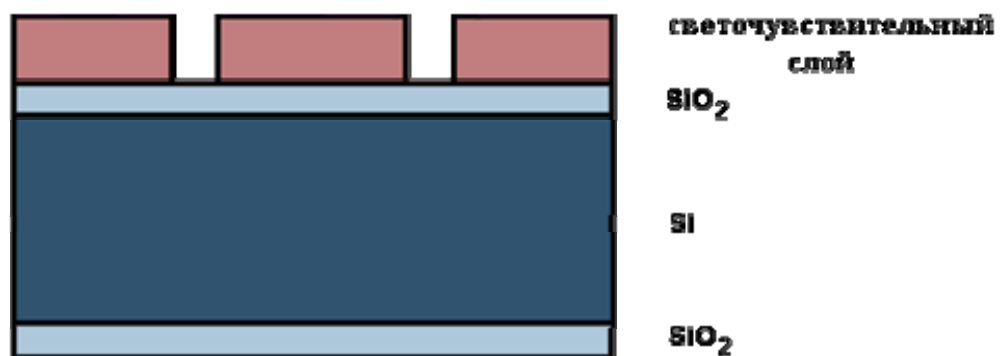
Дальше на пластину наносится еще один защитный слой, на этот раз - светочувствительный, и происходит одна из ключевых операций - удаление в определенных местах ненужных участков его и пленки окислов с поверхности пластины, до обнажения чистого кремния, с помощью фотолитографии.

На первом этапе пластину с нанесённой на её поверхность плёнкой

светочувствительного слоя помещают в установку экспонирования, которая по сути работает как фотоувеличитель. В качестве негатива здесь используется прецизионная маска - квадратная пластина кварцевого стекла покрытая плёнкой хрома там, где требуется. Хромированные и открытые участки образуют изображение одного слоя одного чипа в масштабе 1:5. По специальным знакам, заранее сформированным на поверхности пластины, установка автоматически выравнивает пластину, настраивает фокус и засвечивает светочувствительный слой через маску и систему линз с уменьшением так, что на пластине получается изображение кристалла в масштабе 1:1. Затем пластина сдвигается, экспонируется следующий кристалл и так далее, пока не обработаются все чипы на пластине. Сама маска тоже формируется фотохимическим способом, только засвечивание светочувствительного слоя при формировании маски происходит по программе электронным лучом примерно также, как в телевизионном кинескопе.



В результате засвечивания химический состав тех участков светочувствительного слоя, которые попали под прозрачные области фотомаски, меняется. Что дает возможность удалить их с помощью соответствующих химикатов или других методов, вроде плазмы или рентгеновских лучей.

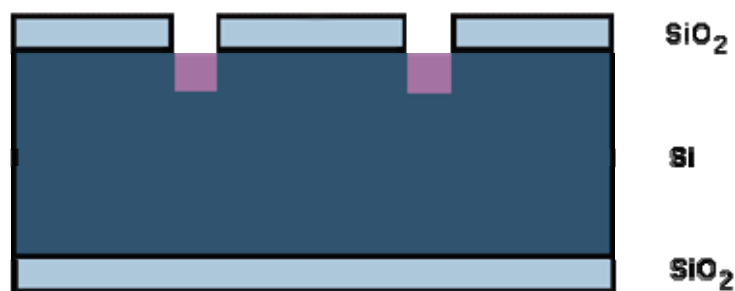


После чего аналогичной процедуре (уже с использованием других веществ, разумеется) подвергается и слой окислов на поверхности пластины. И снова, опять же, уже новыми химикатами, снимается светочувствительный слой:



Потом накладывается следующая маска, уже с другим шаблоном, потом еще одна, еще, и еще... Именно этот этап производства чипа является критическим в плане ошибок: любая пылинка или микроскопический сдвиг в сторону при наложении очередной маски, и чип уже может отправиться на свалку. После того, как сформирована структура чипа, пришло время для изменения атомной структуры кремния в необходимых участках путем добавления различных примесей. Это требуется для того, чтобы получить области кремния с различными электрическими свойствами - р-типа и n-типа, то есть, как раз то, что требуется для создания транзистора. Для формирования р-областей используются бор, галлий, алюминий, для создания n-областей - сурьма, мышьяк, фосфор.

Поверхность пластины тщательно очищается, чтобы вместе с примесями в кремний не попали лишние вещества, после чего она попадает в камеру для высокотемпературной обработки и на нее, в том или ином агрегатном состоянии, с использованием ионизации или без, наносится небольшое количество требуемых примесей. После чего, при температуре порядка от 700 до 1400 градусов, происходит процесс диффузии, проникновения требуемых элементов в кремний на его открытых в процессе литографии участках. В результате на поверхности пластины получают участки с нужными свойствами. И в конце этого этапа на их поверхность наносится все та же защитная пленка из окисла кремния, толщиной порядка одного микрона.

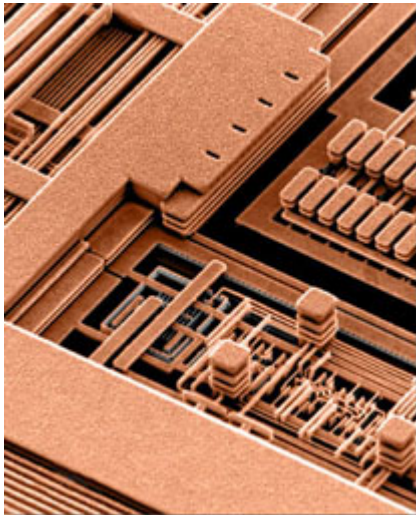


Все. Осталось только проложить по поверхности чипа металлические соединения (сегодня для этой роли обычно используется алюминий, а соединения сегодня обычно расположены в 6 слоев), и дело сделано. В общих чертах, так в результате и получается, к примеру, классический МОП транзистор: при наличии напряжения на затворе начинается перемещение электронов между измененными областями кремния.



Теперь, слегка пробежавшись по классическому процессу создания сегодняшних чипов, можно более уверенно перейти к обзору технологий, которые предполагают внести определенные коррективы в эту картину.

Медные соединения



IBM, техпроцесс CMOS 7S, первая медная технология, начавшая применяться при коммерческом производстве чипов

Первая из них, уже начавшая широко внедряться в коммерческое производство - это замена на последнем этапе алюминия на медь. Медь является лучшим проводником, чем алюминий (удельное сопротивление 0,0175 против 0,028 ом*мм²/м), что, в полном соответствии с законами физики, позволяет уменьшить сечение межкомпонентных соединений. Вполне своевременно, учитывая постоянное движение индустрии в сторону уменьшения размеров транзисторов и увеличения плотности их размещения на чипе, когда использование алюминия начинает становиться невозможным. Индустрия начала сталкиваться с этой проблемой уже в первой половине 90-х. Вдобавок, что толку в ускорении самих транзисторов, если соединения между ними будут съедать весь прирост скорости?

Проблемой при переходе на медь являлось то, что алюминий куда лучше образует контакт с кремнием. Однако после не одного десятка лет исследований, ученым удалось найти принцип создания

сверхтонкой разделительной области между кремниевой подложкой и медными проводниками, предотвращающей диффузию этих двух материалов.

По данным IBM, применение в технологическом процессе меди вместо алюминия, позволяет добиться снижения себестоимости примерно на 20-30 процентов за счет снижения площади чипа. Их технология CMOS 7S, использующая медные соединения, позволяет создавать чипы, содержащие до 150-200 миллионов транзисторов. И, наконец, просто увеличение производительности чипа (до 40 процентов) за счет меньшего сопротивления проводников.

IBM начала предлагать клиентам эту технологию в начале 98 года, в конце этого года своим заказчикам предложили использовать медь при производстве их чипов TSMC и

UMC, AMD начинает выпуск медных Athlon в начале 2000 года, Intel переходит на медь в 2002 году, одновременно с переходом на 0.13 мкм техпроцесс.

Кремний - германий (SiGe)

Соединения - соединениями, но уже на скорости чипа в несколько ГГц перестает справляться с нагрузкой сама кремниевая подложка. И если для традиционных областей применения чипов кремния пока достаточно, в области беспроводной связи уже давно дефицит на дешевые скоростные чипы. Кремний - дешево, но медленно, арсенид галлия - быстро, но дорого. Решением здесь стало использование в качестве материала для подложек соединения двух основ полупроводниковой индустрии - кремния с германием, SiGe. Практические результаты по этой технологии стали появляться с конца 80-х годов. Первый биполярный транзистор, созданный с использованием SiGe (когда германий используется как материал для базы), был продемонстрирован в 1987 году. В 1992 году уже появилась возможность применения при производстве чипов с SiGe транзисторами стандартной технологии КМОП с разрешением 0.25 мкм.

Результатом применения становится увеличение скорости чипов в 2-4 раза по сравнению с той, что может быть достигнута путем использования кремния, во столько же снижается и их энергопотребление. При этом, в ход вступает все тот же решающий фактор - стоимость: SiGe чипы можно производить на тех же линиях, которые используются при производстве чипов на базе обычных кремниевых пластин, таким образом отпадает необходимость в дорогом переоснащении производственного оборудования. По информации IBM, потенциальная скорость транзистора (не чипа!) с их технологией составляет сегодня 45-50 ГГц (что далеко не рекорд), ведутся работы над увеличением этой цифры до 120 ГГц. Впрочем, в ближайшие годы прихода SiGe в компьютер ждать не стоит - при тех скоростях, что потребуется PC чипам в ближайшем будущем вполне хватает кремния, легированного такими технологиями, как медные соединения или SOI.

Кремний на изоляторе (silicon-on-insulator, SOI)

Еще одна технология, позволяющая достаточно безболезненно повысить скорость чипов, не требуя от производителей отказаться от всех их сегодняшних наработок. Как и технология медных соединений, SOI позволяет создателям чипов убить двух зайцев одним выстрелом - поднять скорость, до 25 процентов, одновременно снизив энергопотребление. Что из себя представляет эта технология? Вспомним начало обработки кремниевой пластины - она покрывается тонкой пленкой окисла кремния. А в SOI к этому бутерброду добавляется еще один элемент - сверху опять наносится тонкий слой кремния:



Вот и получается - кремний на изоляторе. Зачем это понадобилось? Чтобы уменьшить емкость. В идеале МОП транзистор должен выключаться, как только будет исчезнет питание с затвора (или наоборот, появится, в случае с КМОП). Но наш мир далеко не идеален, это справедливо и в данном конкретном случае. На время срабатывания транзистора напрямую влияет емкость области между измененными участками кремния, через которую и идет ток при включении транзистора. Он начинает и заканчивает идти не мгновенно, а только после, соответственно, зарядки и разрядки этой промежуточной зоны. Понятно, что чем меньше это время, тем быстрее работает транзистор, можно сказать, что тем меньше его инерция. Для того и придумана SOI - при наличии между измененными участками и основной массой кремния тонкой пластинки изолирующего вещества (окисел кремния, стекло, и т.д.), этот вопрос снимается и транзистор начинает работать заметно быстрее.



Основная сложность в данном случае, как и в случае с медными соединениями, заключается в разных физических свойствах вещества. Кремний, используемый в подложке - кристалл, пленка окислов - нет, и закрепить на ее поверхности, или же не поверхности другого изолятора еще один слой кристаллического кремния весьма трудно. Вот как раз проблема создания идеального слоя и заняла весьма много времени. Не так давно IBM уже продемонстрировала процессоры PowerPC и чипы SRAM, созданные с использованием этой технологии, просигнализовав этим о том, что SOI подошла к стадии возможности коммерческого применения. Совсем недавно, IBM объявила о том, что она достигла возможности сочетать SOI и медные соединения на одном чипе, пользуясь плюсами обеих технологий. Тем не менее, пока что никто кроме нее не заявил публично о намерении использовать эту технологию при производстве чипов, хотя о чем-то подобном речь идет.

Перовскиты

Поиски замены на роль изолирующей пленки на поверхности подложки идут давно, учитывая, что как и алюминий, диоксид кремния начинает сдавать в последнее время - при постоянном увеличении плотности транзисторов на чипе необходимо уменьшать толщину его изолирующего слоя, а этому есть предел, поставленный его электрическими свойствами, который уже довольно близок. Однако пока, несмотря на все попытки, SiO₂ по прежнему находится на своем месте. В свое время IBM, предполагала использовать в этой роли полиамид, теперь пришла очередь Motorola выступить со своим вариантом - перовскиты.

Этот класс минералов в природе встречается довольно редко - Танзания, Бразилия и Канада, но может выращиваться искусственно. Кристаллы перовскитов отличаются очень высокими диэлектрическими свойствами: использованный Motorola титанат стронция превосходит по этому параметру диоксид кремния более чем на порядок. А это позволяет в три-четыре раза снизить толщину транзисторов по сравнению с использованием традиционного подхода. Что, в свою очередь, позволяет значительно снизить ток утечки, давая возможность заметно увеличить плотность транзисторов на чипе, одновременно сильно уменьшая его энергопотребление.

Пока что эта технология находится в достаточно ранней стадии разработки, однако Motorola уже продемонстрировала возможность нанесения пленки перовскитов на поверхность стандартной 20 см кремниевой пластины, а также рабочий КМОП транзистор, созданный на базе этой технологии.

Развитие Технологии Цифровых ИС На GaAs

Арсенид галлия, как материал, обладает электрофизическими характеристиками, позволяющими изготавливать на его основе более быстродействующие приборы по сравнению с кремнием. Однако, в течение многих лет высокая стоимость и хрупкость пластин арсенида галлия в качестве исходного материала, а также высокая плотность дефектов (что вызывало низкий процент выхода годных изделий) сдерживало проникновение арсенид - галлиевых ИС на рынок, где объемы продаж соответствующих ИС находились на низком уровне.

С тех пор положение существенно изменилось. По мере того как ведущие изготовители арсенид - галлиевых ИС начали переходить на 100 мм (а сейчас и на 150 мм) пластины и продолжали уменьшать характеристические размеры до 0,3 мкм, арсенид - галлиевые ИС становились все более конкурентно-способными по сравнению с кремниевыми ИС в смысле себестоимости соответствующих изделий.

Квантовый компьютер

По мнению многих ученых, реальный квантовый компьютер будет создан не ранее чем

через десятилетия. К настоящему моменту сконструированы только простейшие квантовые логические ячейки. Важность этих работ состоит в том, что, являясь единым квантовым объектом, квантовый компьютер мог бы производить вычисления во много тысяч раз быстрее самых совершенных современных компьютеров. Существует, однако, и скептическая точка зрения, состоящая в том, что в процессе вычислений квантовые неопределенности будут приводить к накоплению ошибок, в результате чего эффективное применение квантового компьютера станет невозможным. Чтобы решить эту проблему, теоретики из Лос-Аламосской национальной лаборатории (Калифорния, США) разработали новый алгоритм проведения вычислений на будущих квантовых компьютерах. Алгоритм основан на многократных повторениях отдельных цепочек вычислений. Благодаря огромному быстродействию квантового компьютера, такие повторения не скажутся заметно на скорости его работы и в то же время позволят снизить суммарную ошибку вычислений до приемлемого уровня. Таким образом, показана принципиальная возможность создания корректно работающего квантового компьютера.

Взлеты и падения быстрой одноквантовой логики

Энергия - ключ к микроэлектронике будущего

Просматривая свежие научные и инженерные журналы, посвященные проектированию современных сверхбыстрых полупроводниковых СБИС и базирующихся на них устройств (например, микропроцессоров либо телекоммуникационных коммутаторов), подкованный читатель рано или поздно приходит к простому выводу: одним из первостепеннейших факторов, ограничивающих их быстродействие, является непропорциональное и без того высокой и продолжающей расти степени интеграции активных элементов (транзисторов) энерговыделение. В качестве иллюстрации приведу следующий пример. Базовым элементом телекоммуникационных коммутаторов для сетей асинхронного режима передачи (АТМ) является коммутатор цифровых последовательных каналов с двумя входами и двумя выходами. Изготовленный с использованием технологии GaAs, такой коммутатор потребляет 10 ватт на частоте 10 гигагерц. Нетрудно подсчитать, что для коммутации, скажем, 1024 каналов с достаточно скромной суммарной пропускной способностью в 1 терабайт в секунду потребуется мощность 500 киловатт. Кроме того, тактовая частота в 10 гигагерц, вероятно, является предельной для современных полупроводниковых технологий, будь то GaAs, InP либо SiGe.

Оптические чипы

Говоря компьютер, мы все еще подразумеваем электронно-вычислительную машину, хотя аббревиатуру ЭВМ встречаем в литературе все реже и реже. Почти полвека понадобилось, чтобы преодолеть дистанцию от первой вакуумной электронной лампы (Нобелевская премия 1928 г., О. У. Ричардсон, Кембридж) до первого транзистора (Нобелевская премия 1956 г., Д. Бардин, У. Браттейн, У. Б. Шокли, "Белл телефон лабораториз"), и почти столько же, чтобы практически полностью вытеснить из жизни людей компьютеры механические. В гордом одиночестве компьютерная электроника прошла славный путь от простейших логических элементов на дискретных компонентах (RTL-, DTL-логика) до сверхбольших интегральных схем и ЭВМ на

Нейро - чипы

Обсуждаются текущие и перспективные технологические тенденции развития элементной базы нейронных систем: УБИС и 2D-, 3D-нейросистем на пластинах.

Рассматриваются современные и будущие возможности реализации для субмикронных, микромощных нейросистем гигауровня интеграции. Показано, что новые возможности для нейрочипов и двух-, трехмерных нейросистем на пластинах будут регулироваться технологическими прорывами экономических и системных ограничений и барьеров.