

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ  
ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:

Е.С. Машкина,

Е.Н. Бормонтов

Издательско-полиграфический центр  
Воронежского государственного университета

2013

Утверждено Научно-методическим советом физического факультета  
от 16.05.2013 г., протокол № 5

Рецензент: доктор химических наук, доцент Тутов Е.А.

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для самостоятельной работы студентов 3 и 4 курса физического факультета.

Для специальностей 010803 – Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 210100 – Электроника и наноэлектроника.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВЫ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	5
2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	11
2.1. Формирование слоя фоторезиста.....	11
2.2. Формирование защитного рельефа фоторезиста .....	16
2.3. Формирование топологического рельефа на подложке .....	21
3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТОГРАФИИ .....	22
3.1. Рентгенолитография .....	23
3.2. Электронная литография .....	25
3.3. Литография с ультрафиолетовым излучением.....	26
ЗАДАНИЯ.....	30
ВОПРОСЫ .....	34
ЛИТЕРАТУРА.....	36

## ВВЕДЕНИЕ

Один из создателей корпорации Intel Гордон Мур в 1965 году высказал предположение, которое впоследствии назвали законом Мура: число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые полтора-два года, а их размеры с той же скоростью уменьшаться. И если в 1971 году проектные нормы производства микросхем были 10 мкм, то сейчас речь идет о размерах меньше 20 нм. Ключевой технологией, обеспечивающей достижение этих результатов, является фотолитография. А фотолитографическое оборудование является одним из самых сложных, точных и дорогих в машиностроении.

Преимуществами процесса фотолитографии являются универсальность, массовость, технологичность, возможность автоматизации. С помощью фотолитографии на одной подложке можно получить большое число элементов будущих приборов и микросхем, что позволяет проводить групповую обработку подложек по заранее выбранному технологическому маршруту. Фотолитография является сложным комплексным технологическим процессом, включающим в себя механические, оптические, физические, физико-химические и химические процессы. К ним относятся: выбор исходного светочувствительного материала (фоторезиста), его очистка и обработка; подготовка подложек (химико-динамическая очистка); формирование светочувствительных пленок на поверхности подложки; операция термообработки, экспонирования, проявления, химического травления.

Фотолитография развивается в двух направлениях: постоянное совершенствование высокоточного оборудования и технологических процессов с целью стабильного воспроизводства формы и размеров рисунка и разработка новых приемов, позволяющих расширить предельные возможности процесса создания рисунка на подложке.

## **1. ОСНОВЫ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Одной из проблем развития твердотельной электроники является воспроизводимое получение топологических структур с минимальными размерами элементов (от 180 нм и менее) и высокой точностью их расположения. Формирование геометрии элементов изделий твердотельной электроники и их топологии осуществляется литографическими процессами, которые используются при создании любого планарного прибора – от диода до интегральной микросхемы (ИМС).

Цель фотолитографии – создание на поверхности полупроводниковой подложки защитного рельефа (маски) требуемой конфигурации. Для этого на подложку наносят тонкий слой светочувствительного и стойкого к агрессивным средам вещества – фоторезиста. Слой фоторезиста подвергают воздействию ультрафиолетового излучения. При этом между источником излучения и фоторезистом помещают фотошаблон, прозрачные и непрозрачные участки которого создают изображение элементов прибора.

В результате воздействия излучения свойства фоторезиста изменяются в нужных участках. Далее ненужные участки фоторезиста удаляют и на подложке образуется рельефный рисунок, соответствующий рисунку фотошаблона. Этот рельеф используют как защитную маску при травлении подложки, проведения локальной диффузии или металлизации.

Таким образом, с помощью фотолитографии создается требуемая геометрия прибора, его активных областей, контактов, соединений и т.д. При изготовлении сложных полупроводниковых приборов и ИМС операции фотолитографии могут повторяться до сотни раз. При этом на каждом этапе изображение используемого фотошаблона должно совмещаться с изображением, полученным на пластине на предыдущих операциях фотолитографии.

Схема технологического процесса фотолитографии: формирование слоя фоторезиста (обработка пластины, нанесение фоторезиста, сушка),

формирование защитного рельефа (экспонирование, проявление, сушка), формирование топологического рельефа (травление или осаждение, удаление фоторезиста).

**Фоторезисты.** В основе фотолитографии лежит фотохимическое действие света на вещество (фоторезист), в результате которого происходит изменение некоторых его свойств, в частности скорости растворения в определенных химических веществах.

Фоторезисты представляют собой сложные полимерно-мономерные системы, обладающие с одной стороны светочувствительными свойствами, а с другой защитными (или резистивными), т.е. выдерживают нагрев, действие кислот и щелочей.

В зависимости от механизма протекающих в фоторезисте реакций при их облучении светом и особенностей изменения их свойств фоторезисты делят на *позитивные и негативные* (рис. 1).

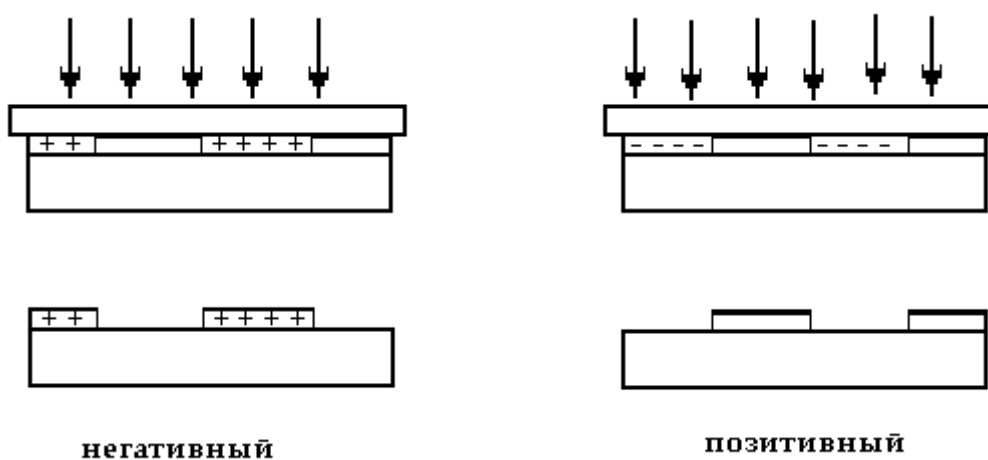


Рис. 1. Типы фоторезистов.

*Негативные* фоторезисты под действием света образуют нерастворимые участки рисунка на поверхности пластины и после проявления остаются на ее поверхности. Рисунок на поверхности пластины представляет собой негативное изображение оригинала.

*Позитивные* фоторезисты, наоборот, под действием света образуют растворимые участки, в этом случае рисунок оригинала в точности повторяется на поверхности пластины.

В качестве негативного фоторезиста применяется состав на основе сложного эфира поливинилового спирта и коричной кислоты – поливинилциннамат (ПВЦ). Готовый фоторезист ПВЦ представляет собой порошок белого или желтоватого цвета, растворяющийся в органических составах – растворах толуола с хлорбензолом, ацетата метиленгликоля с метаксилолом. Наибольшее применение этот фоторезист находит в планарной технологии для защиты двуокиси кремния от травителя.

В качестве позитивного фоторезиста используют состав, содержащий нафтохинодиазид и сульфозфир новолака с различными полимерами (НХДА). Растворителями служат спирты, кетоны, ароматические углеводороды, диоксан, ксилол.

В основе изменения свойств фоторезистов под воздействием излучения лежат следующие фотохимические реакции:

Фотополимеризация – соединение молекул мономера в полимерные макромолекулы и образование нерастворимых участков. Данный процесс является типичным для негативных фоторезистов.

Фотоконденсация – сшивание линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений. Протекание этих процессов в негативных фоторезистах приводит к их высокой кислотостойкости.

Фотолиз – разложение облученной молекулы светочувствительных соединений с образованием растворимых веществ. На этом основано действие большинства позитивных фоторезистов, в которых фотолиз приводит к растворимости облученных участков в щелочных составах.

Все фоторезисты характеризуются светочувствительностью и контрастностью, разрешающей способностью, устойчивостью к химическим воздействиям и стабильностью эксплуатационных свойств.

Светочувствительность – величина, обратная экспозиции, требуемой для перевода фоторезиста в растворимое или нерастворимое состояние. Чем меньшая экспозиция требуется для изменения растворимости фоторезиста, тем более он светочувствителен.

Контрастность фоторезиста определяет его способность ослаблять влияние побочных явлений при экспонировании, вызывающих неравномерность освещенности по контуру изображения.

Светочувствительность и контрастность фоторезиста определяется из характеристических кривых, которые представляют собой зависимость толщины слоя фоторезиста на экспонированных участках от экспозиции.

Под разрешающей способностью фоторезиста понимают максимально возможное число отдельно передаваемых линий защитного рельефа, разделенных промежутками такой же ширины, на 1 мм подложки. Разрешающая способность фоторезиста зависит от зернистости и дисперсности его структуры.

Химическая устойчивость – устойчивость фоторезиста к концентрированным кислотам и щелочам. При этом травитель не должен проникать сквозь маску фоторезиста, а также между подложкой и слоем фоторезиста по периметру рисунка.

Стабильность эксплуатационных свойств фоторезиста выражается сроком его службы при определенных условиях хранения и использования.

Выбор типа фоторезиста и условий его применения определяется назначением фотолитографического процесса. Основным достоинством позитивных фоторезистов является более высокая по сравнению с негативными фоторезистами разрешающая способность, что объясняется различиями в



поглощении ультрафиолетового излучения. Применение негативных фоторезистов позволяет расширить возможности технологических процессов фотолитографии и в конечном итоге – планарной технологии.

**Фотошаблоны.** Под фотошаблоном обычно понимают стеклянную пластину с нанесенным на нее рисунком, который имеет определенные формы, размеры и расположение. Фотошаблоны могут быть прямыми и обратными в зависимости от того, повторяет ли рисунок на фотошаблоне оригинал или является его негативным отображением. Чаще всего основу фотошаблонов изготавливают из оптического стекла и рисунок на поверхность стекла наносят фотолитографическим методом.

*Свойства фотошаблонов:*

- высокая разрешающая способность;
- большое число идентичных изображений;
- высокая контрастность;
- большая оптическая плотность непрозрачных участков;
- точность всех размеров рисунка;
- точность размера шага между элементами;
- высокое качество поверхности рисунка;
- однородность рисунка;
- стабильность рисунка и его размеров во времени;
- стойкость к истиранию;
- плоскостность рабочей стороны.

В зависимости от материала пленочного покрытия различают фотошаблоны на основе фотографической эмульсии (эмульсионные фотошаблоны), металлической пленки (металлические фотошаблоны), а также ряда других материалов, например окиси железа (цветные фотошаблоны). Металлические фотошаблоны обычно изготавливаются на основе пленок хрома методами термического испарения или ионного распыления.

Применяются также фотошаблоны с маскирующими покрытиями из соединений хрома (нитрид хрома), характеризующиеся большим разрешением и точностью по сравнению с хромовыми, поскольку эти покрытия имеют более низкий коэффициент отражения света.

Цветные фотошаблоны применяются для уменьшения эффектов отражения света, что достигается использованием диэлектрических или полупроводниковых покрытий. Обычно они изготавливаются на основе пленок окиси железа, оксида кремния, халькогенидных соединений и имплантированных фоторезистов.

Рисунок фотошаблона переносится на полупроводниковую пластину в масштабе 1:1. Это означает, что основные технико-экономические показатели производства изделий твердотельной электроники (процент выхода годных изделий, производительность) во многом определяются качеством фотошаблонов и трудоемкостью их изготовления.

*Основные этапы изготовления фотошаблона.* Сначала изготавливают оригинал рисунка топологического слоя в увеличенном масштабе (до 500:1), затем одно- или многократно уменьшают его до масштаба 10:1, т.е. получают промежуточный фотошаблон. После этого окончательно уменьшают рисунок до масштаба 1:1 и распечатывают (мультиплицируют) его по всему рабочему полю шаблона, т.е. получают эталонный фотошаблон. Завершающей операцией является изготовление рабочих фотошаблонов – изготовление копии с эталонного фотошаблона, т.к. эталонные фотошаблоны из-за их высокой стоимости использовать для фотолитографии невыгодно. Эталонные фотошаблоны применяют только при изготовлении сложных заказных ИМС.

Основные дефекты при изготовлении фотошаблонов: Вырывы, выступы (отклонение границы края рисунка от прямой линии); проколы (сквозные отверстия в непрозрачном покрытии фотошаблона); нестравки

(непрозрачные участки на прозрачном поле фотгошаблона); скругление углов (изменение конфигурации углов элементов). Годными считаются те шаблоны, которые прошли контроль в технологическом бюро и выполнены соответствующие требования к ним.

## **2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

### **2.1. Формирование слоя фоторезиста**

*Подготовка поверхности пластин.* От состояния поверхности подложки зависят адгезия и однородность нанесенного на пластину слоя фоторезиста.

При разработке фоторезистов их состав выбирают таким, чтобы угол смачивания на наиболее широко используемых поверхностях – термическом и пиролитическом оксидах, нитриде кремния, металлах (Al, Cr, Cu) – был практически равен нулю.

В большинстве случаев достаточно проводить обезжиривание подложек в парах органических растворителей: толуола, трихлорэтилена четыреххлористого углерода. Для удаления физико-химических загрязнений производят их травление. После обезжиривания и травления производят отмывку подложек. Для удаления механических загрязнений используют, например, гидромеханическую отмывку на вращающихся столах или центрифугах.

На окисленные подложки, полученные обычным термическим окислением, желательно наносить фоторезист сразу (в течение 1 ч) после окисления. Если подложки после окисления хранились длительное время, то необходима их термообработка при  $700^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч.

*Нанесение фоторезиста.* При нанесении фоторезиста на подложку необходимо обеспечить заданную толщину, равномерность и однородность пленки, ее адгезию к поверхности пластины. Для исключения вкраплений инородных частиц производят фильтрацию фоторезиста перед его нанесе-

нием, используя мембранные фильтры с различным диаметром пор. Как правило, применяют двухстадийную фильтрацию. На первой стадии фильтруют большие порции фоторезиста сквозь фильтр с диаметром пор 0.5-1 мкм, а затем небольшие порции – сквозь фильтр с диаметром пор 0.25 мкм.

Для нанесения пленки фоторезиста на подложку чаще всего используют центрифугирование и пульверизацию.

*Центрифугирование* заключается в нанесении на пластину, установленную на платформе центрифуги, определенной дозы фоторезиста и получении необходимой толщины пленки за счет вращения центрифуги (рис. 2).

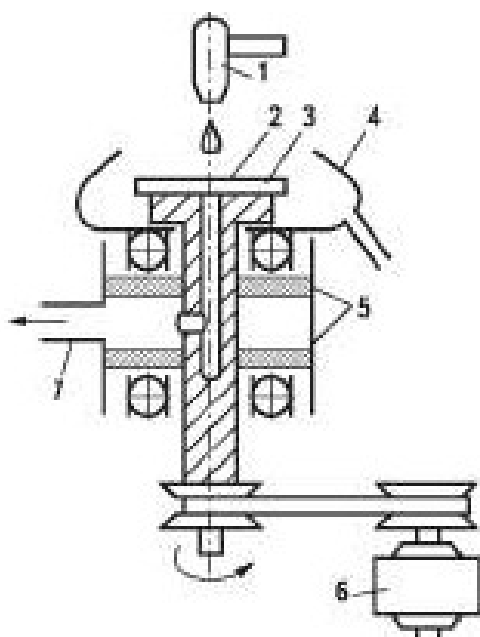


Рис. 2. Схема установки для нанесения слоя фоторезиста центрифугированием: 1 – дозатор; 2 – подложка; 3 – столик-центрифуга; 4 – сборник остатков фоторезиста; 5 – вакуумные уплотнители; 6 – электродвигатель; 7 – трубопровод к вакуумному насосу.

Процесс растекания жидкости на вращающейся подложке происходит под действием центробежных сил. Для получения требуемой толщины пленки изменяют вязкость фоторезиста и регулируют частоту вращения центрифуги. Фоторезист подается на подложку из дозатора.

С момента попадания фоторезиста на пластину начинается интенсивное испарение растворителя, в результате чего вязкость фоторезиста быстро возрастает. В связи с этим время между нанесением фоторезиста и включением вращения должно быть минимальным (до 1 с). Время центрифугирования в зависимости от состава и исходной вязкости фоторезиста составляет 20-30 с. С увеличением частоты вращения центрифуги толщина пленки фоторезиста уменьшается. Рабочая частота вращения центрифуги составляет порядка 6000 об/мин. При изготовлении пластин большого диаметра фоторезист целесообразно дозировать на медленно вращающуюся подложку. Частота вращения при дозировании должна составлять 500-1000 об/мин, по окончании дозирования включают рабочую частоту вращения центрифуги.

Таким образом, толщина слоя фоторезиста и его качество при центрифугировании зависят: от типа фоторезиста и его вязкости, максимальной частоты вращения центрифуги, температуры и влажности окружающей среды, свойств поверхности подложки.

Недостатками центрифугирования являются неустраняемое краевое утолщение слоя, наличие значительных внутренних напряжений в пленке фоторезиста, неудовлетворительная равномерность полученной пленки (особенно для толщин более 2 мкм).

*Пulьверизация* имеет ряд преимуществ по сравнению с центрифугированием: возможность получения пленок различной толщины (от 0.5 мкм до 20 мкм), отсутствие утолщения пленок по краям и дефектов типа «прокол» (меньше в 3-4 раза), возможность нанесения фоторезиста на профилированную поверхность, малый расход фоторезиста (меньше в 10 раз, чем при центрифугировании), обеспечение хорошей адгезии пленки к подложке, высокая производительность и широкие возможности автоматизации процесса.

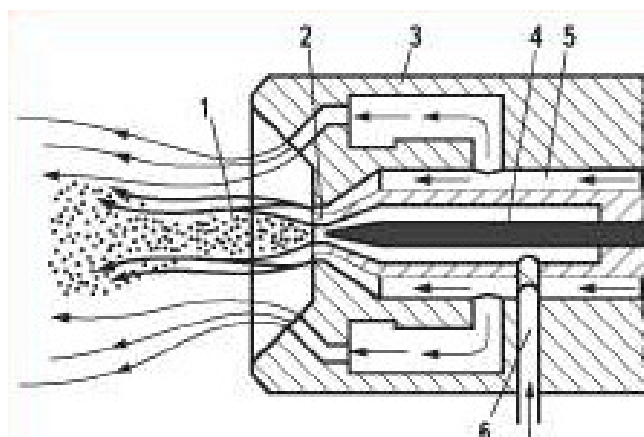


Рис. 3. Схема установки для нанесения фоторезиста методом пульверизации: 1 – область разрежения; 2 – сопло; 3 – форсунка; 4 – регулирующая игла; 5 – распыляющий газ; 6 – подача фоторезиста.

Фоторезист наносят из специальной форсунки, в которой его диспергируют потоком газа при выходе из сопла (рис. 3). Параметры формируемой пленки зависят от давления и температуры газа-носителя, расстояния от сопла до подложки, вязкости фоторезиста и концентрации в нем сухого продукта, а также растворителя. Основной трудностью при нанесении фоторезиста таким способом является устранение пыли и других загрязнений, притягиваемых электростатическим полем или струей воздуха.

**Сушка фоторезиста.** Сушка заканчивает процесс формирования слоя фоторезиста. Ее назначение – повышение прочности пленки фоторезиста и увеличение ее адгезии к поверхности подложки. Эти процессы связаны с испарением растворителя из фоторезиста. При сушке пленки при повышенной температуре, приводящей к интенсивному удалению растворителя, происходят процессы, уплотняющие молекулярную структуру пленки фоторезиста и повышающие ее адгезию. Уплотнение структуры фоторезиста должно происходить в направлении от пластины к поверхности пленки, полностью вытесняя растворитель из фоторезиста. Неполное удаление рас-

творителя снижает кислотостойкость фоторезиста, что приводит к возникновению брака на операции проявления.

Предельной температурой сушки является температура задубливания слоя, при котором происходит потеря светочувствительности фоторезиста. Для большинства фоторезистов она составляет 140-150<sup>0</sup> С.

Чтобы получилась высококачественная пленка часто сушку осуществляют в два этапа: сначала при комнатной температуре в течение 15-30 мин, а затем при температуре 100-150<sup>0</sup> С в течение 3-60 мин.

*Конвективная сушка* производится в термошкафах при 90-100<sup>0</sup> С. Теплопередача осуществляется конвективными потоками газа, которые перемещаются между элементами сушильной камеры, имеющими различную температуру. При конвективной сушке в первую очередь высыхает поверхностный слой фоторезиста и удаление растворителя из пленки становится возможным лишь за счет разрыва поверхностного слоя, что увеличивает плотность дефектов. В зависимости от состава и толщины пленки фоторезиста конвективную сушку проводят в течение 10-60 мин.

*Радиационная инфракрасная сушка.* В этом случае используется лучистый нагрев изделий инфракрасным излучением. При этом вследствие слабого поглощения инфракрасного излучения фоторезистом поверхность пленки фоторезиста нагревается меньше, чем подложка. Источником теплоты для фоторезиста является полупроводниковая пластина, и фронт сушки перемещается от пластины к поверхности слоя. Это существенно повышает качество сушки при сокращении времени обработки до 5-15 мин.

*СВЧ-сушка.* Пластины нагреваются за счет поглощения электромагнитной энергии СВЧ-поля. Сушка производится в установках мощностью 200-400 Вт при рабочей частоте 2.45 ГГц в течение нескольких секунд. При таком способе сушки устраняется опасность перегрева фоторезиста, резко повышается производительность.

При любом способе сушки ее режим (температура и время выдержки) должен исключать появление преждевременных структурных превращений ФР. Обычно допустимая температура сушки не превышает 120 С. Высушенный ФР необходимо экспонировать не позднее чем через 10 ч.

## **2.2. Формирование защитного рельефа фоторезиста**

*Экспонирование.* Основным условием качественного проведения операции экспонирования является оптимальная экспозиция, т.е. время воздействия УФ излучения на слой фоторезиста, при котором происходит изменение его свойств. Экспонирование фоторезиста производят через фотошаблон, определяющий топологию изготавливаемого прибора.

Оптимальное время экспонирования устанавливают при сенситометрических испытаниях фоторезиста и по их результатам строят характеристическую кривую зависимости оптической плотности светочувствительного слоя от экспозиции.

Перед экспонированием фоторезиста необходимо совместить элементы схемы на фотошаблоне с соответствующими элементами схемы на подложке, покрытой фоторезистом. При проведении первой литографии, когда поверхность пластины однородна, совмещение значительно упрощается. Для этого фотошаблон располагают относительно полупроводниковой пластины так, чтобы границы его модулей были параллельны или перпендикулярны базовому срезу пластины. Это повышает качество последующего разламывания платины на кристаллы.

Для последующих совмещений в комплектах используемых фотошаблонов предусмотрены специальные метки. Для визуального совмещения наиболее удобными являются метки с контролируемыми зазорами, в которые необходимо «вписать» окружность в окружность, квадрат в квадрат и т.д. Знаки совмещения, сформированные на платине в предшествую-



щем цикле литографии, визуально различимы благодаря ступеньке в оксиде, нитриде кремния или металле и прозрачности слоя фоторезиста. Для совмещения применяют микроскопы. Процесс совмещения проводят в два этапа. Сначала осуществляют грубое совмещение в пределах всего поля пластины с помощью контрольных модулей – пустых кристаллов, а затем – точное по меткам.

Для передачи изображения фотошаблона на пластину применяют контактный и проекционный способы. При контактном способе при экспонировании пластину прижимают к фотошаблону и световое излучение источника, проходя через конденсор, засвечивает светочувствительный слой пластины. Время экспонирования регулируют открытием и закрытием затвора. Зазор не должен превышать глубины резкости используемого микроскопа, чтобы оператор мог наблюдать одновременно метки совмещения на фотошаблоне и полупроводниковой пластине.

При *контактной* литографии тесный контакт между фотошаблоном и пластиной при экспонировании происходит лишь в нескольких точках. На большей площади между фотошаблоном и слоем фоторезиста наблюдается зазор, обусловленный неплоскостностью контактирующих поверхностей. Наличие зазора оказывает существенное влияние на качество переноса изображения фотошаблона на пластину из-за дифракционных явлений света. Неравномерность освещения приводит к тому, что после проявления элементы фотомаски имеют нерезкий контур – вуаль. Размеры вали определяются зоной не полностью сшитого или разрушенного слоя фоторезиста и зависят от экспозиции. Оптимальная экспозиция позволяет получать минимальный размер вали и улучшить контрастность рисунка фотомаски. Увеличение экспозиции сверх оптимальной приводит к увеличению вали. В связи с этим контроль качества изображения необходимо проводить на раз-

личных участках пластины. Установленная при этом оптимальная выдержка контролируется реле времени.

Достоинства контактной литографии: высокая производительность, низкая стоимость оборудования, малые габаритные размеры. Недостатки: быстрый износ фотошаблонов, неровность поверхности полупроводниковой пластины приводит к увеличению плотности дефектов на фотошаблоне при каждом экспонировании. Этот недостаток устраняют снижением усилия контакта пластины с фотошаблоном (мягкий контакт) или созданием небольшого (5-20 мкм) зазора между ними, но при этом уменьшается разрешающая способность формируемого изображения. Кроме того, контактная литография не позволяет получать элементы размером менее 1 мкм и имеет общую низкую воспроизводимость рисунки по полю пластины из-за кривизны ее поверхности.

При *проекционной* литографии подложка и фотошаблон не контактируют друг с другом, что повышает стойкость фотошаблона и увеличивает качество изображения. По способу формирования изображения на подложке проекционным экспонированием различают системы с одновременным переносом изображения ФШ на все рабочее поле пластины в масштабе 1:1 и системы с последовательным мультиплицированным переносом изображения в уменьшенном масштабе. В последнем случае используют промежуточный фотошаблон.

С помощью проекционной литографии воспроизводимо получают элементы размером менее 1 мкм, что недостижимо при контактном способе. При этом предъявляются более жесткие требования к толщине слоя фоторезиста и экспозиции.

В современных проекционных системах используют совершенную оптику, разрешающая способность которой ограничена явлениями дифракции, а не погрешностями при передаче изображения. В следствие высоких

требований к точности совмещения (погрешность не превышает нескольких долей мкм) и экспонирования эти процессы выполняют на специальных прецизионных установках совмещения и экспонирования, являющихся сложными оптико-механическими комплексами. Они характеризуются точностью совмещения, высокой разрешающей способностью, производительностью, большим сроком службы фотошаблонов, можно выполнять операции на больших пластинах.

**Проявление.** Процесс проявления негативных и позитивных фоторезистов заключается в удалении после экспонирования ненужных участков фоторезиста с поверхности подложки. В результате на поверхности остается защитный рельеф требуемой конфигурации. При проявлении негативных фоторезистов происходит растворение неэкспонированных участков резиста, а при проявлении позитивных – растворение экспонированных участков.

Проявление негативных фоторезистов производят в органических растворителях – трихлорэтилене, толуоле, хлорбензоле, ксилоле, а позитивных – в неорганических соединениях со щелочными свойствами (слабых водных и водно-глицериновых растворах КОН, NaOH,  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  - тринатрийфосфат).

Экспонирование и проявление неразрывно связаны между собой. Для выбора режимов, обеспечивающих точную передачу размеров элементов, одновременно изменяют время проявления и экспонирования или подбирают оптимальное значение одного параметра при фиксации другого.

При постоянных условиях проявления с ростом экспозиции увеличиваются размеры элементов для позитивного фоторезиста и уменьшаются для негативного. При этом для негативного фоторезиста режимы проявления слабо влияют на точность передачи изображения и перепроявление для них неопасно. Для позитивного фоторезиста проявление сопряжено с час-

тичным растворением, а именно, с уменьшением толщины и подтравливанием по контуру незасвеченных участков.

Таким образом, для негативных фоторезистов точность воспроизведения рисунка зависит практически только от режимов экспонирования. Для позитивных фоторезистов режимы проявления являются определяющими для качества изображения и должны быть согласованы с режимами экспонирования.

Качество воспроизведения изображения при проявлении зависит от отношения скоростей растворения облученных и необлученных участков фоторезиста, которые определяются условиями реакции растворения (температурой, концентрацией проявителя и его водородным показателем pH).

После проявления в защитном рельефе обнаруживается неидеальность перехода от участков, покрытых фоторезистом, к участкам, свободных от него. Причиной неидеальности переходов является дифракция, рассеяние и отражение света в системе подложка-резист-шаблон. Профиль края между прозрачными и непрозрачными участками фоторезиста можно представить в виде краевого клина. При увеличении длительности экспонирования, исходной толщины слоя фоторезиста и отражающей способности подложки крайевой клин будет увеличиваться.

Распространенными способами проявления являются: погружение в раствор проявителя, выдержка в парах органического соединения, пульверизация.

После проявления контролируют качество изображения под микроскопом.

**Сушка фоторезиста.** Целью процесса сушки фоторезиста (дубления) после проявления является испарение остатков проявителей, размягчающих слои, и его дополнительная тепловая полимеризация. Температура сушки рельефа должна быть выше температуры сушки слоя фоторезиста.

От температуры и характера повышения ее во время сушки зависит точность передачи размеров изображений. Резкий нагрев вызывает оплавление краев, поэтому для точной передачи изображений менее 1 мкм следует применять плавное или ступенчатое повышение температуры. Так при обработке позитивного фоторезиста рекомендуется следующий режим сушки: 10-15 мин при комнатной температуре, 20-25 мин при 120<sup>0</sup> С, затем плавный подъем температуры до 150-160<sup>0</sup> С. Для негативных фоторезистов качество литографии улучшается по мере увеличения температуры сушки до 200-250<sup>0</sup> С и времени выдержки до 1 ч.

### **2.3. Формирование топологического рельефа на подложке**

Заключительной операцией литографии является формирование топологического рельефа на подложке, в которое входят: травление (маскирующих, изолирующих защитных, проводящих и других слоев), удаление фоторезиста и отмывка подложки (перед диффузией, металлизацией, пассивацией).

Процесс травления производится для удаления с поверхности платины пленки SiO<sub>2</sub> или металла, не защищенной слоем задубленного фоторезиста. Способы травления – химический, плазмохимический, ионнохимический. Травление диоксида кремния осуществляют в плавиковой кислоте. Водный раствор кислоты быстро проникает под пленку фоторезиста, вызывая подтравливание окисла. Для уменьшения этого явления в раствор плавиковой кислоты вводится фтористый аммоний. Травление металлических пленок (чаще всего алюминиевых) проводят в HCl, пленок золота – в царской водке.

После травления пластины подвергают тщательной промывке в деионизованной воде. Задубленный слой фоторезиста удаляют в горячей концентрированной азотной или серной кислоте, после чего проводят контроль

геометрических размеров полученного в окисном или металлическом слое рисунка.

### 3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТОГРАФИИ

Важнейшей характеристикой литографического процесса является его разрешающая способность. От нее напрямую зависит минимальная толщина линии, которую можно нанести на фоторезисте. В современном производстве сверхбольших и ультрабольших ИС применяется проекционная литография, обеспечивающая высокое разрешение. В проекционной литографии используются линзы или зеркала, позволяющие проецировать рисунок маски-шаблона с уменьшением масштаба. Разрешающая способность проекционной литографии, то есть минимальная толщина линии, которую можно получить на фоторезисте, определяется критерием Релея:

$$RES = \frac{k_1}{(\lambda/N_A)},$$

где  $\lambda$  – длина волны источника излучения,  $N_A$  – числовая апертура объектива, а  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа фоторезиста и самого технологического процесса.

Из формулы для разрешающей способности оптической литографии следует, что более высокое разрешение можно получить за счет увеличения числовой апертуры проекционной установки или перехода к источникам излучения с более короткой длиной волны.

Однако увеличение числовой апертуры проекционной установки имеет негативное последствие. Дело в том, что кроме разрешающей способности литографический процесс характеризуется еще и глубиной резкости. Если разрешающая способность определяет характерный поперечный размер фокусировки, то глубина резкости – характерное расстояние фокусировки в продольном направлении.

Увеличение числовой апертуры объектива негативно сказывается на уменьшении глубины резкости, а чем меньше глубина резкости, тем большую точность необходимо обеспечить при размещении пластины в проекционной установке, чтобы выдержать параллельность ее фокальной плоскости (плоскости фокуса) с точностью до долей микрометра. Поэтому единственный способ увеличить разрешающую способность литографического процесса при заданной глубине резкости заключается в том, чтобы перейти к источникам излучения с более короткой длиной волны.

### **3.1. Рентгенолитография**

Экспонирование резиста рентгеновским излучением. Использование излучения с малой длиной волн (0.4-5 нм) повышает разрешающую способность литографии до 50 нм, а отсутствие дифракционных явлений обеспечивает большую глубину резкости изображений (зазор между пластиной и шаблоном может достигать 10 мкм). Кроме того, рентгеновские лучи нечувствительны к различным загрязнениям на шаблоне (пылинкам, остаткам резиста, следам влаги).

Пластина, на которой получают изображение, покрыта полимерной пленкой – рентгенорезистом, которая чувствительная к рентгеновскому излучению. На определенном расстоянии (микрозазор) от пластины устанавливают рентгеновский шаблон, представляющий собой прозрачную для рентгеновских лучей подложку с нанесенной на нее топологией в виде тонкой пленки, сильно поглощающей рентгеновские лучи. Источником рентгеновского излучения является мишень, рабочую поверхность которой бомбардирует пучок электронов.

Экспонирование пластины производится расходящимся пучком рентгеновского излучения, поскольку для него нельзя сделать систему линз и зеркал. Рентгеновские трубки являются источником рентгеновского излу-

чения, возникающего в результате бомбардировки материала мишени пучком ускоренных электронов. Пучок электронов создается электронной пушкой.

Материал мишени выбирается в зависимости от характеристик используемых рентгенорезистов, т.к. их коэффициент поглощения различен для различных длин волн рентгеновского излучения. Для получения длинноволнового излучения используют мишени из Cu ( $\lambda=1.33$  нм) и Al ( $\lambda=0.834$  нм), а для коротковолнового – мишени из Mo ( $\lambda=0.54$  нм).

При поглощении квантов рентгеновского излучения молекулами резиста в них происходит генерация фотоэлектронов, обладающих энергией  $10^{-16}$  Дж и способных изменять химическую структуру резиста. Движение электронов (рассеяние) происходит до тех пор, пока энергия не упадет до  $10^{-18}$  Дж. Путь, проходимый электронами в резисте, определяет его разрешающую способность при данной длине волны облучения. Для получения высокой разрешающей способности поглощающая пленка маски должна быть тонкой иметь резкие края и сильно ослаблять рентгеновские лучи. Поглощение рентгеновского излучения зависит от материала пленки и длины волны излучения. Высоким коэффициентом поглощения обладает золото, причем его поглощение максимально при длине волны рентгеновского излучения молибденового источника.

К достоинствам рентгенолитографии относятся: высокая разрешающая способность (минимальный размер элементов 50-100 нм); отсутствие контакта с шаблоном (зазор 3-10 мкм зависит от размера изготавливаемых структур); нечувствительность к загрязнениям, поскольку они не поглощают рентгеновского излучения; отсутствие отражения и рассеяния излучения в резисте; независимость разрешающей способности от типа резиста, поскольку она одинакова на позитивных и негативных резистах.



Одними из существенных недостатков рентгенолитографии является большое время экспонирования (несколько минут) и высокая стоимость оборудования.

### **3.2. Электронная литография**

Способ электролитографии заключается в создании маски на поверхности полупроводниковой пластины обработкой специального слоя (электронорезиста) электронным пучком.

В отличие от оптического и рентгеновского излучения поток электронов не является электромагнитным излучением. Электрон несет заряд, что позволяет формировать (фокусировать) и отклонять пучок электронов с помощью электрических и магнитных полей. Электронная литография позволяет, на нынешнем уровне развития технологии, получать структуры с разрешением до 10 нм.

При попадании быстро движущихся электронов в слой электронорезиста они теряют часть своей кинетической энергии за счет электростатического взаимодействия с электронами, входящими в состав молекулы полимера. При этом происходит выбивание электронов из молекул или возбуждение молекулы. В негативных электронорезистах свободные радикалы объединяются между собой и образуют поперечные связи между цепями. В позитивных электронорезистах активные группы оказываются неустойчивыми и распадаются на  $n$  частей.

Электронорезисты изготавливают на основе полимеров, имеющих высокую прозрачность в видимом и УФ свете. В качестве позитивных широко используются резисты на основе полиметилкрилата и полибутенсульфона, в качестве негативных – на основе полиглицидилметакрилата..

Разрешающая способность электронорезистов определяется рассеянием электронов в резисте, их отражением от поверхности полупроводнико-

вой пластины и вторичными электронами, испускаемыми атомами подложки.

Засвечивание резиста по определенному рисунку производят с помощью тонкофокусированного пучка электронов, отклоняемого электрическими или магнитными полями. Для передачи рисунка используют генераторы изображения или электронные проекторы.

Первый способ обработки пластины заключается в том, что обрабатываемая пластина разбивается на определенное число одинаковых по размеру областей, называемых полями, на которых происходит экспонирование резиста сканированием электронного зонда при неподвижной пластине. Во втором способе производят одновременное сканирование зондом и механическое стола с пластиной.

Однако электронная литография имеет невысокую производительность и используется в промышленности и научных исследованиях только при производстве единичных экземпляров электронных компонентов, где требуется нанометровое разрешение.

### **3.3. Литография с ультрафиолетовым излучением**

При производстве ИМС высокой степени интеграции в современной литографии используется коротковолновое ультрафиолетовое излучение лазера с длиной волны  $\lambda=248$  нм (технологический процесс 350, 250 и 180 нм) и  $\lambda=193$  нм (технологический процесс 180, 130, 90 и 65 нм). Эта литография получила название DUV (Deep UltraViolet – глубокое ультрафиолетовое излучение).

Для того чтобы увеличить разрешающую способность литографического процесса при использовании коротковолнового ультрафиолетового излучения с  $\lambda=193$  нм, применяют различные технологии улучшения разрешающей способности, например маски-шаблоны с фазовым сдвигом. В

таких масках, которые, по сути, представляют собой голограммы, на одну из двух соседних прозрачных линий накладывается фазовый фильтр, сдвигающий фазу проходящей волны на  $180^\circ$ . В результате интерференции волн в противофазе происходит их взаимное ослабление в области между двумя экспонируемыми линиями, что делает их хорошо различимыми и повышает разрешающую способность (рис. 4).

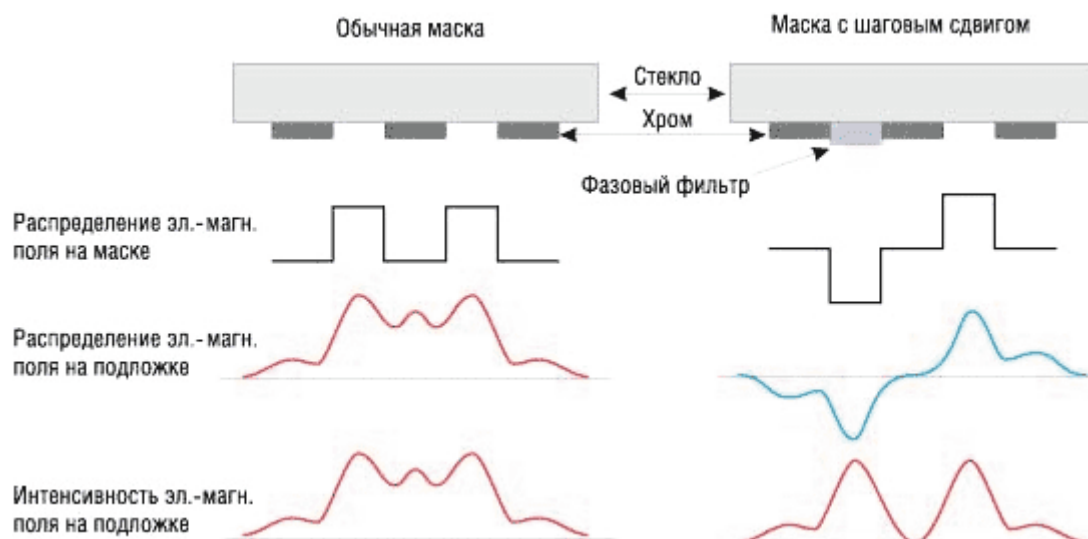


Рис. 4. Распределение электромагнитного поля при использовании обычной маски-шаблона и маски-шаблона с фазовым сдвигом.

Шаблоны с фазовым сдвигом начали применять в 65-нм технологическом процессе. В результате предпринятых шагов по улучшению традиционной DUV-литографии выяснилось, что оптическую литографию с источником излучения 193 нм можно использовать и для 45-нм техпроцесса.

Однако при применении коротковолнового ультрафиолетового излучения с длиной волны 193 нм уже недостаточно применять лишь одни маски-шаблоны с фазовым сдвигом, чтобы достичь разрешающей способности, характерной для топологической нормы 32 нм (32-нм техпроцесс).

Считалось, что возможности оптической DUV-литографии ограничены технологическим процессом 45 нм и переход на технологический процесс 32 нм потребует использования новых источников излучения. Так,

предполагалось, что для литографии с проектной топологией 32 нм будет применяться так называемая EUV-литография (Extreme UltraViolet – сверх- жесткое ультрафиолетовое излучение), которая основана на использовании ультрафиолетового излучения с длиной волны 13.5 нм.

Переход с DUV- на EUV-литографию обеспечивает более чем 10-кратное уменьшение длины волны и переход в диапазон, где собственные транзисторам размеры сопоставимы с размерами всего нескольких десятков атомов.

Однако с применением EUV-излучения связаны и некоторые проблемы. Поскольку свет с длиной волны 13.5 нм поглощается всеми материалами, в том числе стеклом, из которого изготавливаются традиционные линзы, в EUV-литографии используется полностью отражающая, а не пропускающая оптика. Новая технология предполагает применение серии из четырех специальных выпуклых зеркал, которые уменьшают и фокусируют изображение, полученное после использования маски. Каждое такое зеркало содержит 80 отдельных металлических слоев толщиной примерно в 12 атомов. Маски-шаблоны, которые традиционно являются пропускающими, также должны быть и отражающими. Кроме того, вся система должна находиться в вакууме, поскольку световые волны диапазона EUV поглощаются воздухом.

Чтобы сделать EUV-литографию доступной для широкого использования, ее предстоит усовершенствовать. В частности, необходимо разработать механизм, способный захватывать невидимый свет, создать платформы для совмещения топологии на различных этапах изготовления микросхемы, систему зеркал и бездефектных масок, а также новые средства контроля и измерения.

Применение DUV-литографии в 32- и 22-нм технологических процессах стало возможным лишь благодаря существенным изменениям, позво-

ляющим улучшить разрешающую способность. Так, в 32-нм технологическом процессе используется не «сухая» проекционная DUV-литография, как в 45-нм технологическом процессе, а иммерсионная литография. При иммерсионной литографии кремниевые пластины с нанесенным слоем фоторезиста помещаются в воду (жидкость). Коэффициент преломления воды выше, чем коэффициент преломления вакуума, что эквивалентно уменьшению эффективной длины волны проходящего через воду излучения. При этом длина волны уменьшается ровно в  $n$  раз, где  $n$  – показатель преломления используемой жидкости. Уменьшение длины волны излучения позволяет повысить разрешающую способность литографии.

Для повышения разрешающей способности в 22-нм технологическом процессе применяется иммерсионная 193-нм литография в сочетании с технологией двойной экспозиции. Если применяемый литографический процесс не позволяет достичь требуемой разрешающей способности с использованием одной маски-шаблона, то вместо одной литографической маски-шаблона применяются две маски и соответственно два процесса экспозиции фоторезиста. Двойная экспозиция позволяет повысить разрешающую способность в два раза. Однако для этого требуется вдвое больше масок и технологических операций.

Таким образом, применение технологии двойной экспозиции позволяет повысить разрешающую способность литографического процесса без необходимости перехода к новым коротковолновым источникам излучения.

## ЗАДАНИЯ

1. Определить минимальное количество литографий, необходимых для изготовления изопланарного транзистора с диффузионной базой.

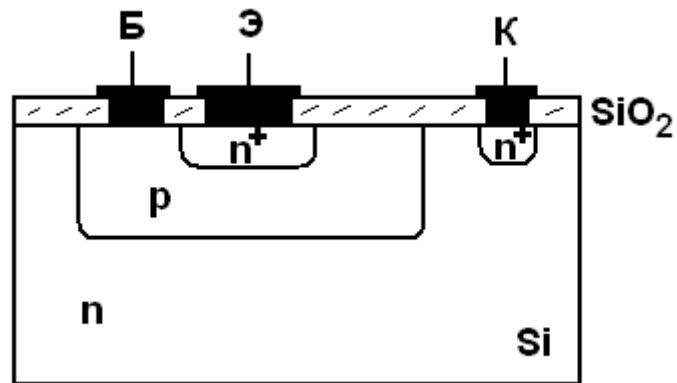


Рис. 1.1. Изопланарный транзистор с диффузионной базой.

2. Технологический процесс изготовления биполярного транзистора. Определить минимальное количество литографий, необходимых для изготовления планарно-эпитаксиального биполярного транзистора.

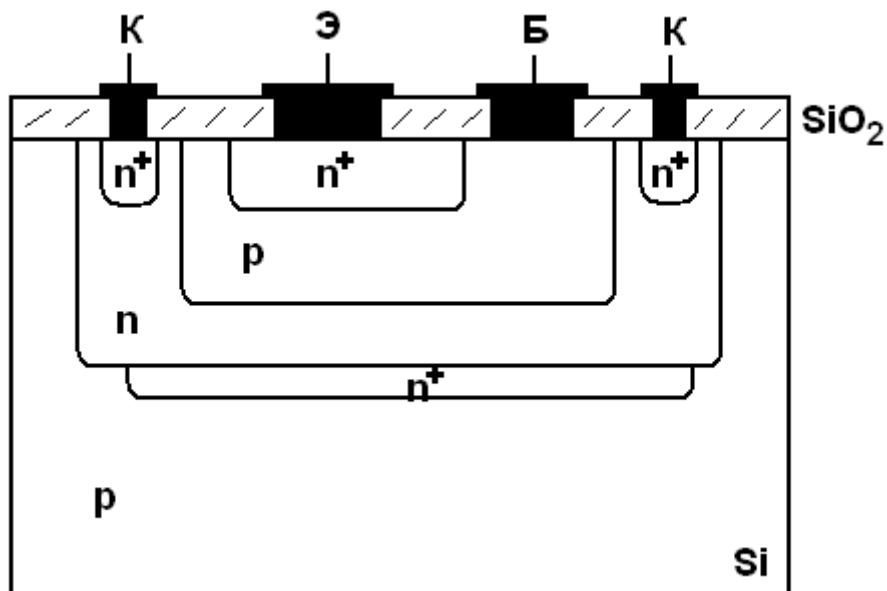


Рис. 1.2. Планарно-эпитаксиальный биполярный транзистор.

3. Технологический процесс изготовления комплиментарной пары МДП-транзисторов. Определить минимальное количество литографий, необходимых для изготовления структуры.

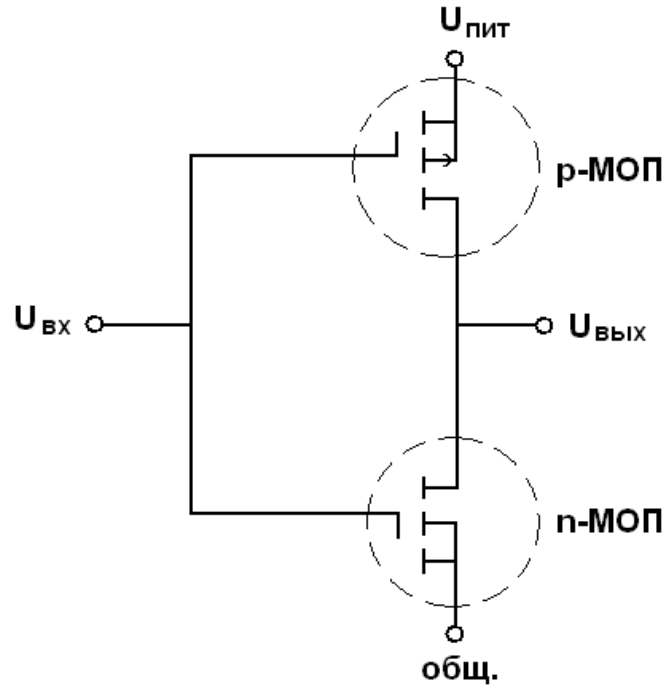


Рис. 1.3. Принципиальная схема КМОП-инвертора.

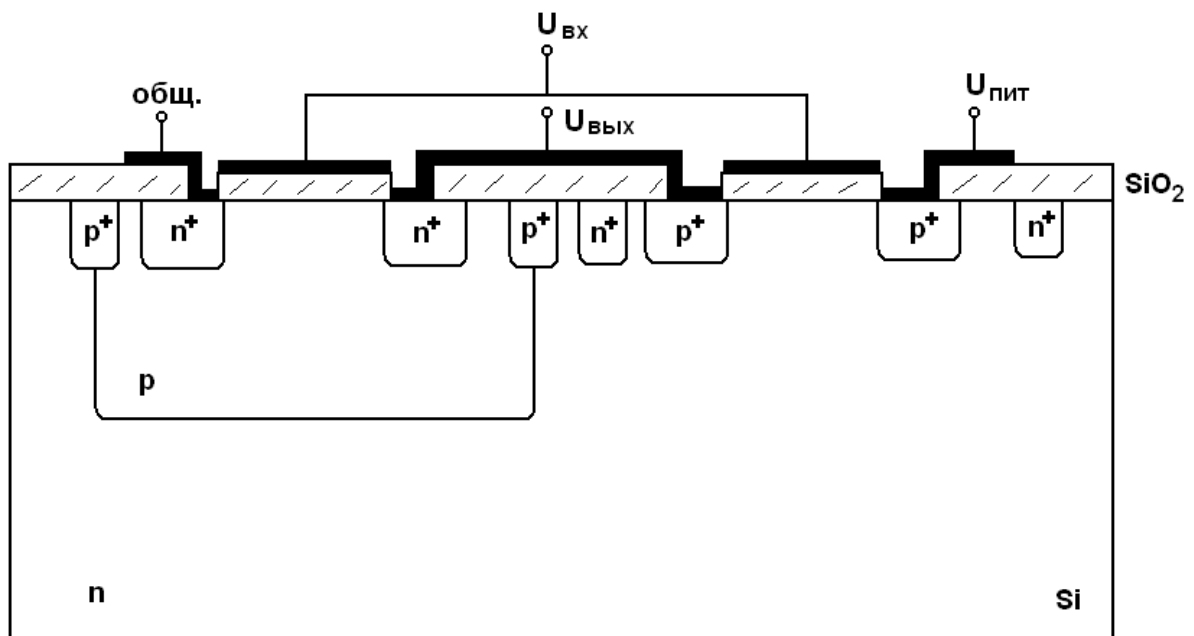


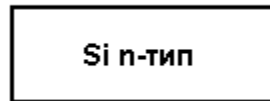
Рис. 1.4. КМОП-инвертор.

## Пример

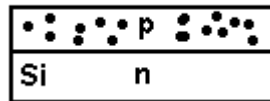
Технологический процесс изготовления полевого транзистора.

Определить минимальное количество литографий, используемых при изготовлении полевого транзистора.

1. Исходная пластина Si.

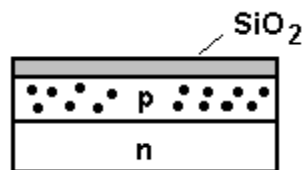


2. Эпитаксиальное наращивание пленки Si p-типа.

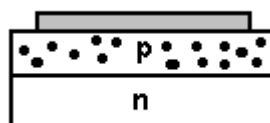


3. Создание эпитаксиального кармана.

3.1. Окисление кремния.

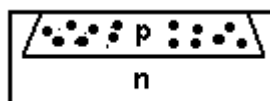


3.2. Фотолитография, травление SiO<sub>2</sub>, создание маски под разделительную диффузию.



3.3. Диффузия примеси n-типа на глубину эпитаксиального слоя.

3.4. Удаление маски SiO<sub>2</sub>.

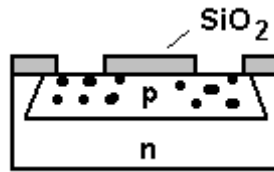




4. Создание областей истока и стока.

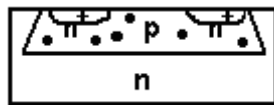
4.1. Окисление пластины.

4.2. Фотолитография, травление  $\text{SiO}_2$ , создание окон под диффузию.



4.3. Диффузия примеси n-типа.

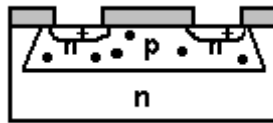
4.4. Удаление маски  $\text{SiO}_2$ .



5. Создание подзатворного диэлектрика, вскрытие окон под контакты.

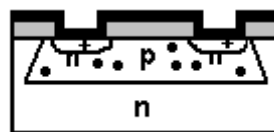
5.1. Окисление пластины.

5.2. Фотолитография, травление  $\text{SiO}_2$ .

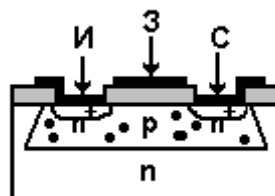


6. Создание затвора и контактов к областям истока и стока.

6.1. Напыление пленки Al.



6.2. Фотолитография, травление Al.



Минимальное количество литографий – 4.

## ВОПРОСЫ

1. С какой целью используется литографический процесс в технологии твердотельной электроники?
2. Что такое фоторезист? Назовите типы фоторезистов. Перечислите основные свойства фоторезистов.
3. Что такое фотошаблон? Какими свойствами должен обладать фотошаблон?
4. Назовите основные дефекты, возникающие при изготовлении фотошаблонов.
5. Перечислите основные этапы литографического процесса.
6. Какие способы используются для нанесения фоторезистов?
7. Какими преимуществами обладает пульверизация перед центрифугированием?
8. Для чего после нанесения фоторезиста проводится его сушка? В чем преимущества радиационной ИК- и СВЧ-сушки перед обычной термической?
9. Что такое экспозиция?
10. Что такое контактная литография? В чем заключаются ее достоинства и недостатки?
11. Что такое проекционная литография и в чем ее основное отличие от контактной литографии?
12. Какие растворители используются для проявления негативных и позитивных фоторезистов?
13. Каковы особенности проявления негативных и позитивных фоторезистов?
14. Какими способами проводится проявление фоторезистов?
15. С какой целью проводится сушка фоторезиста после его проявления?

16. Как происходит формирование топологического рельефа на подложке?
17. От каких параметров зависит разрешающая способность современной проекционной литографии?
18. В чем заключаются особенности рентгенолитографии?
19. В чем заключается принципиальное отличие электронной литографии от оптической литографии и рентгенолитографии?
20. Перечислите основные технологические процессы, использующие литографию с ультрафиолетовым излучением.
21. Что такое DUV-литография и EUV-литография?
22. С какой целью в DUV-литографии используются маски-шаблоны с фазовым сдвигом?
23. В чем заключаются трудности использования EUV-литографии для технологических процессов 32- и 22-нм?
24. Что такое иммерсионная литография и каковы ее особенности?
25. Каким способом в 22-нм технологическом процессе можно дополнительно повысить разрешающую способность?

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная литература

1. Курносов А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.И. Курносов, В.В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.
2. Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых и диэлектрических приборов / Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. – СПб. : Лань, 2002. – 422 с.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники / И.П.Степаненко. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 488 с.
4. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В.Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 2007. – 464 с.

### Дополнительная литература

1. Запорожский В.П. Обработка полупроводниковых материалов / В.П. Запорожский, Б.А. Лапшинов. – М.: Высш. шк., 1988. – 184 с.
2. Малышева И.А. Технология производства интегральных микросхем / И.А. Малышева. – М.: Радио и связь, 1991. – 344 с.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
4. Лозовский В.Н., Константинова Г.С., Лозовский С.В. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. – СПб.: Лань, 2008. – 336 с.

*Учебное издание*

ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:

**Машкина** Екатерина Сергеевна,

**Бормонтов** Евгений Николаевич