

## **Лекция 2. Технология производства интегральных микросхем**

**Цель лекции** – предоставить студентам знания об основах технологии производства интегральных микросхем, охватывая их основные этапы, используемые материалы и процессы, а также современные тенденции и вызовы в этой области.

### **Введение**

Производство интегральных микросхем – это сложный и многогранный процесс, требующий высокой точности и продвинутых технологий. Понимание этапов производства и технологий, используемых в этом процессе, критично для разработки новых и улучшения существующих электронных устройств. Современные тенденции в области материалов, технологий и упаковки продолжают изменять ландшафт микросхем, открывая новые возможности для инноваций и развития в области цифровых технологий.

КМОП-процесс требует большого количества шагов, каждый из которых состоит из последовательности базовых операций. В ходе процесса изготовления ряд этих шагов и/или операций часто периодически повторяется.

### **Основные этапы производства интегральных микросхем**

#### **Подложка**

Базовым материалом для процесса изготовления является монокристаллическая слаболегированная пластина. Такие пластины обычно имеют диаметр от 10 до 30 см и толщину до 1 мм. Получаются они путем нарезания монокристаллического слитка на тонкие пластинки (рис. 6.1). Исходная пластина р-типа может быть легированной до уровня примерно  $2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Перед передачей пластин в производство часто ее поверхность легируется до более высокого уровня, и поверх этого сильнолегированного слоя наращивается монокристаллический эпитаксиальный слой с проводимостью противоположного типа. Важной метрикой является плотность дефектов исходного материала. Высокая плотность дефектов приводит к увеличению доли неработоспособных микросхем и, как следствие, к увеличению стоимости конечного продукта.



Рисунок 6.1. Нарезание монокристаллического слитка на тонкие пластины

#### **Фотолитография**

В ходе выполнения каждого шага процесса определенные области кристалла микросхемы маскируются с использованием соответствующего фотошаблона, так что требуемая обработка может производиться только на оставшейся незакрытой части чипа. Обработка может быть различной, включая окисление, травление, осаждение металла или поликремния и ионную имплантацию. Метод, который позволяет осуществлять селективное маскирование, называется фотолитографией и постоянно используется в процессе изготовления интегральных микросхем. Можно выделить следующие этапы (рис. 6.2).

1. Формирование окисного слоя. Этот этап необязателен и заключается в формировании на всей поверхности пластины тонкого слоя  $\text{SiO}_2$  путем выдержки пластины в атмосфере из смеси кислорода и водорода с высокой степенью очистки при температуре около  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Оксид используется как изолирующий слой или подзатворный диэлектрик транзисторов.

2. Нанесение фоторезиста. Светочувствительный полимер (подобный латексу) путем вращения пластины наносится равномерным слоем толщиной примерно  $1\text{ }\mu\text{м}$ . Исходный материал растворим в органическом растворителе, но обладает тем свойством, что под воздействием света по поперечные связи в полимере сшиваются, делая его нерастворимым. Фоторезист такого типа называется негативным. Позитивный фоторезист имеет противоположное свойство: первоначально нерастворимый, он становится растворимым после освещения. При использовании позитивного и негативного резистов одна и та же маска может иногда участвовать в двух этапах технологического процесса, делая доступными для обработки взаимодополняющие области кристалла микросхемы. Поскольку с уходом технологий в область все меньших размеров стоимость одного фотошаблона увеличивается достаточно быстро, то уменьшение количества шаблонов — задача высокоприоритетная

3. Пошаговое экспонирование. Стеклопластиковая маска (или фотооригинал), содержащая рисунок структур, которые надо перенести на кремний, устанавливается в непосредственной близости от поверхности пластины. Маска непрозрачна в тех областях, которые должны будут подвергнуться обработке, и прозрачна в других (предполагается, что используется негативный фоторезист). Стеклопластиковую маску можно рассматривать как негативное изображение одного слоя микросхемы. Затем совмещенная маска и пластина подвергаются воздействию ультрафиолетового света. В тех местах, где маска прозрачна, фоторезист становится растворимым.

4. Проявление и дублирование фоторезиста. Для удаления необлученных светом областей фоторезиста пластина проявляется в кислотном или щелочном растворе. После удаления необлученных участков фоторезиста пластина подвергается “мягкому дублированию” при низкой температуре, в результате которого увеличивается стойкость оставшегося фоторезиста.

5. Кислотное травление. В областях пластины, незакрытых фоторезистом, выполняется селективное удаление материала. Осуществляется это в зависимости от подлежащего удалению материала путем использования различных кислотных, щелочных или солевых растворов. Большая часть работ с химикатами проводится в больших установках с жидкостными ваннами, в которых под конкретные задачи готовятся специальные растворы. Вследствие опасной природы некоторых из растворителей большую важность приобретают вопросы, связанные с техникой безопасности и воздействием на окружающую среду.

6. Отмывка и сушка. В специальной установке отмывки и сушки осуществляется очистка пластины в деионизованной воде с последующей сушкой азотом. Микроскопический масштаб современных полупроводниковых приборов означает, что даже мельчайшие частички пыли или грязи могут вызвать повреждение схемы. Чтобы этого не происходило, все этапы обработки выполняются в сверхчистых помещениях, где количество пылинок в одном кубическом футе поддерживается на уровне от 1 до 10. Кроме того, там, где это возможно, операции выполняются с использованием автоматических и роботизированных установок. Это объясняет тот факт, что стоимость современных производственных помещений достигает нескольких миллиардов долларов. Но даже при всем этом во избежание загрязнения и для удаления остатков от предшествующих операций обработки пластины должны постоянно подвергаться очистке.

7. Различные обработки. Открытые области теперь могут подвергаться различной обработке, например, ионной имплантации, плазменному травлению или осаждению металла. Эти операции будут рассмотрены в последующих разделах.

8. Удаление фоторезиста (или сжигание). Для селективного удаления остатков фоторезиста без повреждения слоев приборов используется обработка в высокотемпературной плазме.

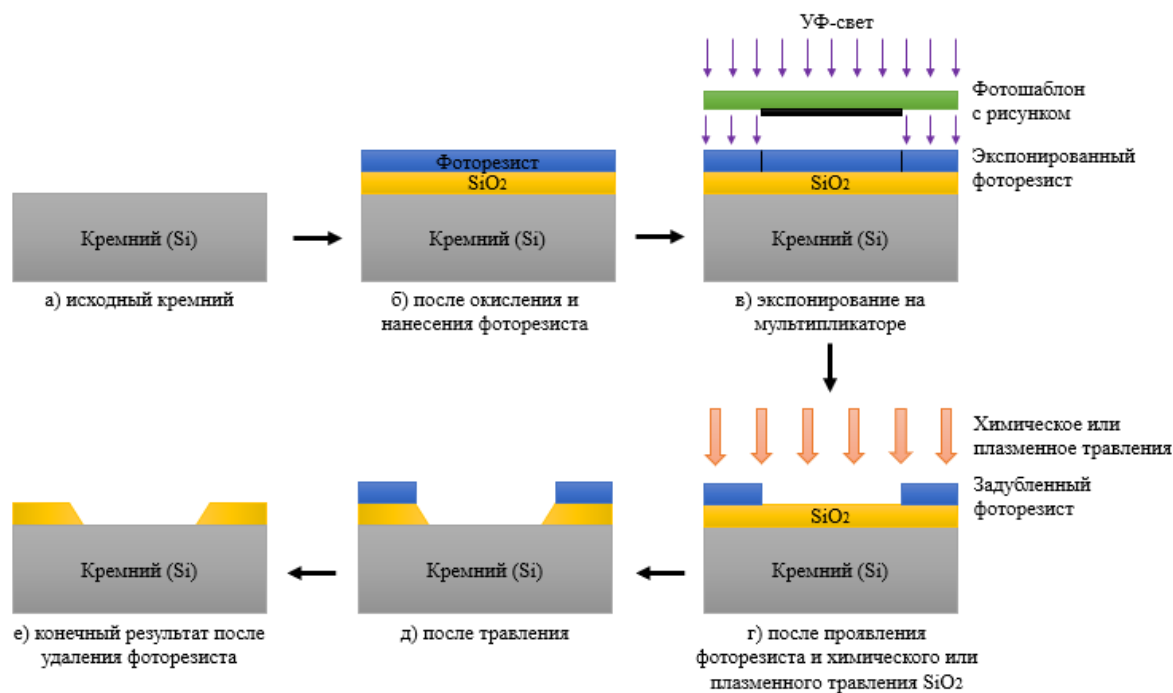


Рисунок 6.2. Этапы обработки при создании рисунка в слое SiO<sub>2</sub>

### *Диффузия и ионная имплантация*

Многие шаги процесса изготовления интегральных схем требуют изменения концентрации легирующей примеси на некоторых участках материала. В качестве примеров можно привести создание областей стока и истока, карманов и контактов к подложке, легирование поликремния и подгонку порогов приборов. Существуют два подхода к введению легирующих примесей: диффузия и ионная имплантация. Оба метода предусматривают вскрытие подвергающихся легированию областей, при этом остальная поверхность пластины остается закрытой слоем буферного материала, в роли которого обычно выступает SiO<sub>2</sub>.

В случае диффузионной имплантации пластины помещают в кварцевую трубу, находящуюся в разогретой печи. В трубу подается газ, содержащий легирующую примесь. Высокая температура печи, обычно от 900 до 1100 °С, вызывает диффузию легирующей примеси в открытые области пластины в вертикальном и горизонтальном направлениях. Получающаяся в результате концентрация примеси максимальна у поверхности и уменьшается с глубиной, следуя гауссовому распределению.

При ионной имплантации легирующая примесь вводится в материал в виде ионов. Система ионной имплантации направляет качающийся луч очищенных ионов на поверхность материала. Скорость ионов определяет глубину их проникновения в материал, тогда как ток луча и время облучения определяют дозу. Метод ионной имплантации позволяет независимо управлять глубиной и дозой. Именно по этой причине ионная имплантация в значительной степени вытеснила диффузию при изготовлении современных полупроводниковых приборов.

Однако ионная имплантация, к сожалению, не свободна от побочных эффектов, среди которых одним из наиболее важных является повреждение кристаллической решетки. Столкновения атомов во время имплантации с высокой энергией приводят к смещению атомов подложки, вызывая тем самым появление в материале дефектов. Эта

проблема в значительной степени решается введением последующего этапа отжига, во время которого пластина нагревается примерно до 1000 °С и выдерживается при этой температуре в течение 15-30 минут, после чего медленно охлаждается. Нагрев вызывает тепловые колебания атомов, в результате чего связи восстанавливаются.

### ***Осаждение***

Любой процесс изготовления КМОП-структур требует повторяющегося осаждения на всю поверхность пластины слоя материала, который может играть роль буфера, быть изолирующим или проводящим слоем. Мы уже рассматривали процесс окисления, который позволяет выращивать слой SiO<sub>2</sub>. Для осаждения других материалов требуются другие методы. Например, при формировании рисунка в базовом окисле и как ограничитель имплантации в качестве удаляемого буфера используется нитрид кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Нитрид кремния повсеместно осаждается с использованием процесса, называемого химическим осаждением из паровой фазы. Этот процесс основан на газотранспортной реакции, энергия для которой подводится за счет нагрева до температуры около 850 °С.

С другой стороны, поликремний осаждается посредством химического осаждения, когда над нагретой до 650 °С пластиной, покрытой SiO<sub>2</sub>, пропускается газ силан. В результате реакции получается некристаллический, или аморфный, материал, называемый поликремнием. Чтобы увеличить проводимость материала, после осаждения необходим этап имплантации.

Алюминиевые слои межсоединений обычно наносятся с использованием процесса, известного как распыление. Алюминий испаряется в вакууме, при этом необходимое тепло подводится либо с помощью электронного луча, либо путем ионной бомбардировки. Другие металлы для создания межсоединений, например медь, требуют применения других методов осаждения.

### ***Травление***

После того как материал осажден, для селективного формирования рисунка, например разводки или контактных отверстий, используется процесс травления. Мы уже рассматривали процесс мокрого травления, в ходе которого используются кислотные или щелочные растворы. Например, для травления SiO<sub>2</sub> обычно используется плавиковая кислота с буфером, в качестве которого выступает фтористый аммоний.

В последние годы широко применяется сухое или плазменное травление. Пластина помещается под колпак установки травления, и на нее подается отрицательное смещение. Колпак нагревается до 100 °С и откачивается до давления 7,5 Па, после чего заполняется положительно заряженной плазмой (обычно это смесь азота, хлора и трихлорида бора). Противоположный электрический заряд заставляет быстро движущиеся молекулы плазмы выстраиваться в вертикальном направлении, в результате чего они начинают действовать по типу «микрораспылителя» аппарата с химическим и физическим действием, удаляя материал. Плазменное травление обладает преимуществом направленности, позволяя получать структуры с четкими вертикальными стенками.

### ***Планаризация***

Для надежного осаждения слоя материала на поверхность полупроводника важно, чтобы поверхность была как можно более плоской. Если не предпринять специальных действий, то в процессе изготовления КМОП-схем, когда множество металлических слоев системы межсоединений с перекрывающимися рисунками накладываются друг на друга, это определенно будет порождать проблемы. Поэтому перед осаждением следующего слоя металла поверх изолирующего слоя SiO<sub>2</sub> вводится этап химико-механической планаризации. В этом процессе для придания поверхности прибора плоскостности и

уменьшения высоты ступенек используется суспензия, представляющая собой взвесь в жидкости абразивной составляющей, например окиси алюминия или монооксида кремния.

### Изготовление КМОП микросхемы

Укрупненная схема возможного процесса изготовления КМОП интегральных микросхем приведена на рис. 6.3.

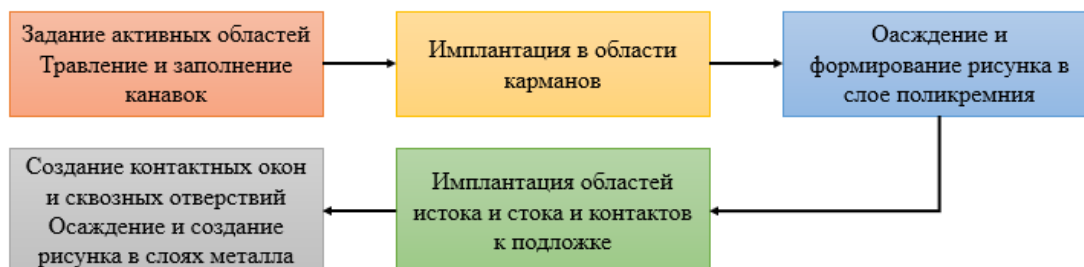


Рисунок 6.3. Упрощенная последовательность этапов процесса изготовления КМОП интегральных микросхем по двухкарманной технологии

Процесс начинается с задания активных областей, т.е. областей, в которых будут формироваться транзисторы. Все остальные области кристалла микросхемы будут закрываться толстым слоем двуоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), называемым защитным окислом. Этот слой оксида играет роль изоляции между соседними приборами и либо выращивается, либо осаждается в вытравленные канавки, – отсюда и название: изоляция канавками. Дополнительная изоляция обеспечивается обратным смещенным p-диодом, образующимся в результате введения под защитный окисел дополнительной p<sup>+</sup>-области, называемой противоканальной (или охранной) областью. На следующем этапе методом ионной имплантации формируются слаболегированные p- и n-карманы. Для формирования в p-кармане n-МОП-транзистора ионной имплантацией (или диффузией) в слаболегированной подложке p-типа формируются сильно легированные области истока и стока n-типа. Области стока и истока разделяются тонким слоем  $\text{SiO}_2$ , называемым подзатворным окислом, который сам закрывается проводящим поликристаллическим кремнием (или поликремнием). Проводящий материал образует затвор транзистора. МОП-транзисторы с каналом p-типа формируются аналогичным образом (только p- и n-области меняются местами). Для обеспечения электрических соединений между транзисторами поверх этих приборов осаждается несколько разделенных диэлектриком слоев металла (чаще всего это алюминий).

Более детальное разбиение технологического маршрута на операции обработки и результаты их влияния на полупроводниковый материал показаны на рис. 6.4. Хотя в свете изложенного выше смысл большинства операций должен быть понятен из рисунка, относительно отдельных операций все же стоит дать небольшой комментарий. Процесс начинается с p-подложки, на поверхности которой сформирован слаболегированный эпитаксиальный p<sup>-</sup> – слой (рис. 6.4, а). Затем осаждается тонкий слой  $\text{SiO}_2$ , который будет служить в качестве подзатворного окисла, и поверх него осаждается удаляемый более толстый слой нитрида кремния (рис. 6.4, б). С использованием фотошаблона, рисунок на котором представляет собой негатив по отношению к рисунку активных областей, методом плазменного травления формируются канавки, изолирующие приборы друг от друга (рис. 6.4, в). После противоканальной имплантации канавки заполняются  $\text{SiO}_2$  и выполняется ряд шагов для обеспечения плоскостности поверхности (включая подтравливание окисла с использованием шаблона-негатива слоя активных областей и

химико-механическую планаризацию). В этот момент удаляется и вспомогательный слой нитрида (рис. 6.4, г).

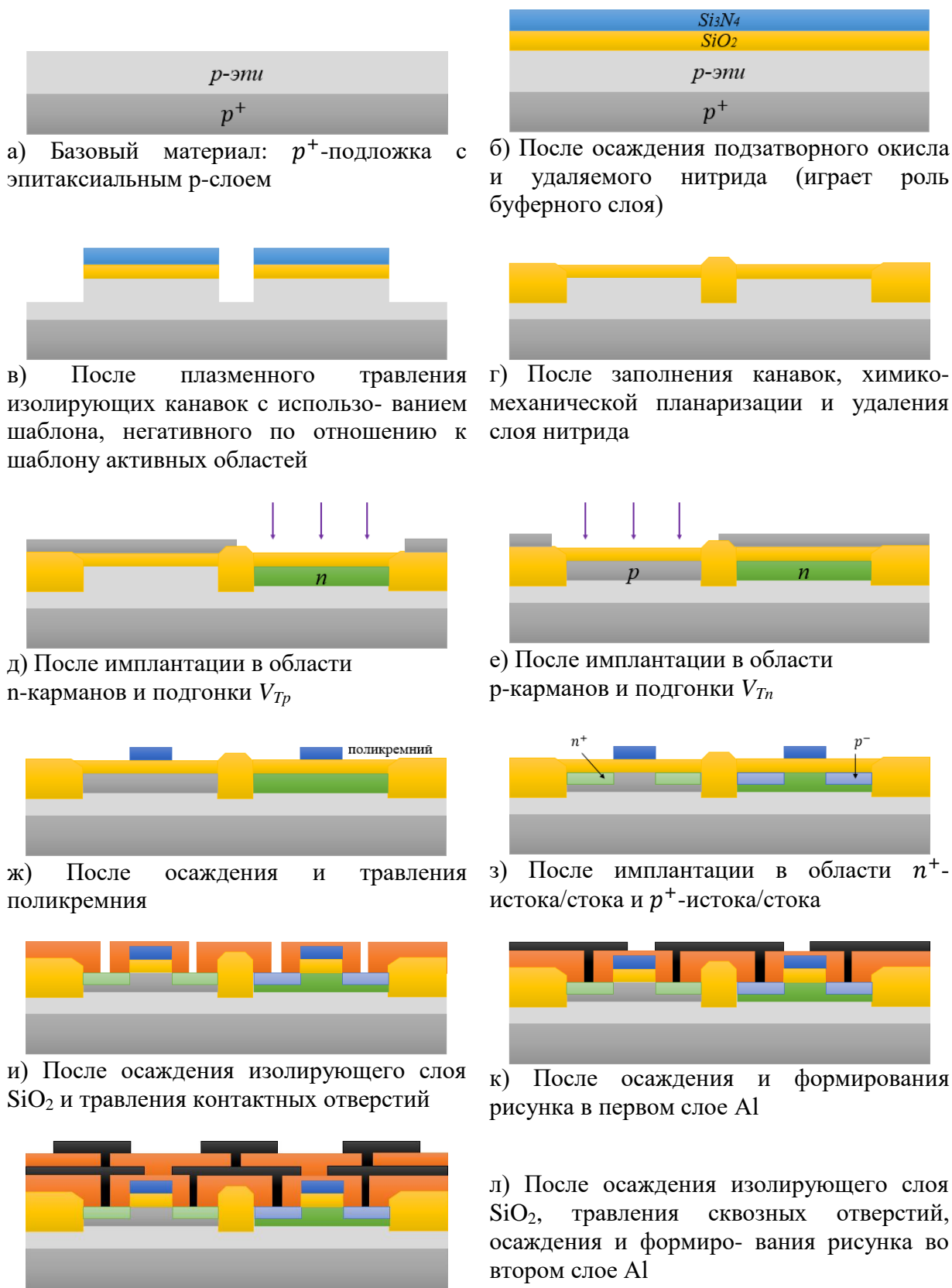


Рисунок 6.4. Диаграмма процесса изготовления  $n$ -МОП и  $p$ -МОП транзисторов по двухкарманной КМОП-технологии

С использованием фотошаблона слоя p-карманов вскрываются области, соответствующие их расположению на кристалле (остальная часть поверхности остается закрытой буферным материалом), после чего выполняется последовательность операций имплантации и отжига, позволяющих получить заданный уровень легирования в кармане. Затем для подгонки величины порогового напряжения p-МОП-транзисторов выполняется вторая имплантация. В ходе данной имплантации изменяется уровень легирования только в той области, которая непосредственно примыкает к подзатворному диэлектрику (рис. 6.4, д). Аналогичные операции (только используется другая легирующая примесь) выполняются и для создания p-карманов и подгонки порогового напряжения n-МОП-транзисторов (рис. 6.4, е). После этого химически осаждается тонкий слой поликремния и с помощью фотошаблона слоя поликремния в нем создается рисунок. Поликремний используется как в качестве материала электрода затвора транзисторов, так и в качестве среды для создания межсоединений (рис. 6.4, ж). Далее последовательно следуют операции ионной имплантации, в ходе которых легируются области истока и стока p-МОП-транзисторов ( $p^+$ ) и n-МОП-транзисторов ( $n^+$ ) соответственно (рис. 6.4, з), после завершения которых стравливается тонкий подзатворный окисел, незакрытый поликремнием. Эти же операции имплантации используются для легирования поверхности поликремния для уменьшения величины его удельного сопротивления. У нелегированного поликремния удельное сопротивление очень высоко. Обратите внимание, что поликремниевый затвор, конфигурация которого формируется до легирования, фактически задает точное расположение области канала и, следовательно, расположение областей истока и стока. Такая процедура, называемая процессом самосовмещения, позволяет добиться очень точного позиционирования двух областей относительно затвора. Метод самосовмещения очень полезен в плане снижения паразитных емкостей транзистора. Процесс продолжается осаждением металлических слоев системы межсоединений. На этом этапе повторяется выполнение следующих операций (рис. 6.4, и-л): осаждение изолирующего материала (чаще всего это  $SiO_2$ ), травление контактных или сквозных отверстий, осаждение металла (чаще всего это алюминий и медь, хотя для нижних слоев часто применяется и вольфрам) и создание рисунка межсоединений. Промежуточные этапы планаризации с использованием химико-механической полировки обеспечивают достаточную плоскостность поверхности даже при наличии нескольких слоев межсоединений. После осаждения последнего слоя металла в целях защиты поверхность закрывается слоем пассивации или остекловывается. Обычно это слой  $SiO_2$ , получаемый методом осаждения из паровой фазы, хотя часто еще добавляется слой нитрида кремния, поскольку он более влагонепроницаем. На последнем этапе вытравливаются окна к контактным площадкам, используемым для термокомпрессионной приварки проволочных выводов.

Поперечное сечение конечного продукта показано на рис. 2.8. Обратите внимание на то, что транзистор занимает только незначительную часть высоты структуры. Большую часть в вертикальном направлении занимают слои системы межсоединений.

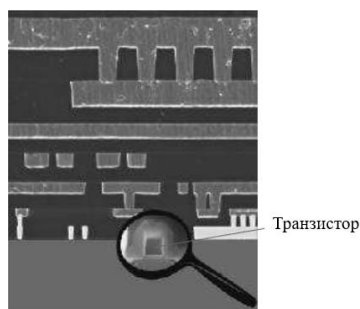


Рисунок 6.5. Поперечное сечение структуры, формируемой в ходе современного процесса создания КМОП интегральной микросхемы

### **Контрольные вопросы:**

1. Что представляет собой исходная подложка для производства интегральных микросхем и как она подготавливается для дальнейших этапов?
2. Опишите процесс фотолитографии и перечислите ключевые этапы этого процесса.
3. В чем разница между диффузией и ионной имплантацией для легирования полупроводникового материала?
4. Как осуществляется осаждение поликремния и алюминия в процессе производства интегральных микросхем?
5. Опишите процесс травления и его важность в технологии производства интегральных микросхем.
6. Что такое химико-механическая планаризация и почему она важна в производстве интегральных микросхем?
7. Опишите общий процесс изготовления КМОП интегральных микросхем по двухкарманной технологии.