Промышленность выпускает большое количество различных БТ, отличающихся своими параметрами, конструктивным исполнением, используемыми материалами, технологией изготовления и др. Например, диапазон мощности усиленных сигналов для различных транзисторов простирается от десятков милливатт до сотен ватт, диапазон частот усиливаемых сигналов – от сотен килогерц до десятков гигагерц и т.д.

В пределах диапазонов основных физических параметров все транзисторы подразделяются на ряд групп: по диапазону частот на низкочастотные (НЧ) – до 30 Мгц, высокочастотные (ВЧ) – до300 МГц, сверхвысокочастотные (СВЧ) - свыше 300 МГц.

По мощности БТ подразделяются на маломощные – до 0,3 Вт, средней мощности – до 1,5 Вт, мощные транзисторы – свыше 1,5 Вт.

Параметры транзисторов целиком и полностью определяются технологией их изготовления и используемыми материалами.

До 1960 г. выпускались, в основном, *сплавные*германиевые транзисторы,. Сплавные *p-n*переходы образовывались в результате вплавления в исходный кристалл полупроводника донорных и акцепторных легирующих примесей. Из-за неупорядоченности границ их вплавления толщина базы *W*таких транзисторов составляла более 30 мкм, а также возникали дефекты кристаллической решётки и краевые эффекты. В результате запрещённая зона заселялась нежелательными примесными состояниями. Кроме того, эта технология не позволяла получать большие площади переходов, а значит, большие значения токов транзисторов. В итоге, сплавные БТ имели коэффициенты усиления тока не более 60-ти, их частотный диапазон не превышал нескольких мегагерц, а предельные значения токов транзистора – нескольких десятков ампер.

Современные транзисторы изготавливаются, по большей части, из кремния по эпитаксиально-планарной технологии - ЭПТ (эпитаксия (от греч. эпи — на, таксис — упорядоченность, планарная от англ. plane - плоскость). ЭПТ - это закономерно ориентированное наращивание кристаллов одного вещества на поверхность другого в виде тонких плёнок. Хороший контакт плёнки одного вещества с поверхностью другого достигается, если близки по величине основные параметры кристаллических решёток веществ, из которых наиболее важным является *постоянная решётки a*– расстояние между ядрами атомов. Явление эпитаксии широко используется в современной микроэлектронике при выращивании тонких монокристаллических полупроводниковых пленок. Путем последовательного наращивания эпитаксиальных пленок образуются так называемые *сандвич-структуры*, на основе которых создаются транзисторы, интегральные микросхемы и т.п. На рис.Т2а изображён поперечный разрез фрагмента подложки (о подложке см. ниже), на котором сформирован с помощью ЭПТ биполярный транзистор, на рис.Т2б приведен вид этого фрагмента сверху (в плане), на котором указаны границы эмиттерной и базовой областей с указанием геометрических размеров эмиттера – длины аЭ и ширины бЭ, а также конфигурация их контактных площадок. На рис. Т2в приведены распределения концентраций примесей по координате *x* (см. рис.Т2а) в направлении от эмиттера к подложке для сечения, проходящего через эмиттерную область (*x*=0 на эмиттерном контакте). Здесь http://ok-t.ru/mydocxru/baza1/817313026441.files/image053.png концентрации доноров в эмиттере, коллекторе, подложке соответственно; http://ok-t.ru/mydocxru/baza1/817313026441.files/image054.png – концентрация акцепторов в базе.

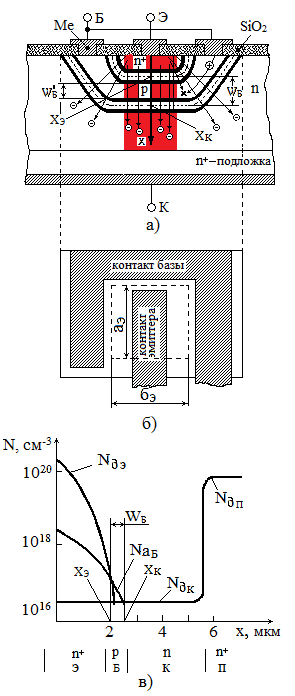
Рассмотрим процесс создания *n-p-n* транзистора с использованием ЭПТ.

Исходный материал получают в процессе плавления шихты, в которой помимо самого полупроводника, например, кремния, содержатся легирующие примеси, определяющие тип проводимости примесного полупроводника. Далее из расплава вытягивают по *методу Чохральского* слитки цилиндрической формы диаметром около 100 мм, которые затем распиливают на тонкие – толщиной один миллиметр – пластины, называемые *подложками.* Подложка является несущей конструкцией, на которой создаются структуры транзисторов. Содержание легирующей донорной примеси в подложке http://ok-t.ru/mydocxru/baza1/817313026441.files/image055.png порядка 1018–1019 см-3 и приближается к пределу растворимости примеси в собственном кремнии, т.е. примерно один атом примеси на 100 – 1000 атомов собственного кремния. Как следствие, материал подложки имеет высокую электропроводность, являясь *низкоомным* материалом. Тип проводимости таких сильно легированных материалов в зависимости от типа примеси обозначается как ***n+***или ***p+***.

Далее подложка шлифуется, полируется, подвергается тонким методам очистки и обезжиривания, что позволяет получить поверхность с минимальным количеством дефектов. Подготовка подложек не связана с изготовлением каких либо конкретных приборов или устройств и является общей стартовой операцией. На подложке, как правило, формируется много однотипных структур - транзисторов, микросхем или иных устройств.

После подготовки подложки на её поверхности выращивается эпитаксиальный слой кремния *n*-типа проводимости толщиной несколько микрометров. В этом слое и создаётся структура будущего транзистора. Одновременно этот слой является коллектором транзистора. Содержание в нём примеси NДК существенно меньше, чем в подложке.

|  |
| --- |
| Рис.Т2.Структура планарного транзистора |



На полученную эпитаксиальную структуру наносят тонкий защитный (маскирующий) слой диоксида кремния SiO2 (либо нитрида кремния Si3N4) путем термического окисления кремния в среде кислорода при температуре 50 – 1200 оС. Оксид кремния является диэлектриком, он гидрофобен, что очень важно, и хорошо растворяется в плавиковой кислоте.

Последующие операции проводятся с использованием метода *фотолитографии*. На окисленную пластину кремния наносят *фоторезист* – вещество, изменяющее свои прочностные свойства под действием электромагнитного излучения оптического диапазона (света). На слой фоторезиста накладывают *маску*, представляющую собой светонепроницаемую плёнку (фотошаблон), перфорированную отверстиями, задающими конфигурацию элементов структур создаваемых приборов. Слой фоторезиста экспонируют (засвечивают) через фотошаблон, после чего засвеченные участки фоторезиста «проявляют», т.е. удаляют в растворителе. Затем в растворе, содержащем плавиковую кислоту, травят обнажившуюся в фоторезисте плёнку диоксида кремния (на фоторезист кислота не действует), вскрывая в ней «окна» Оставшийся фоторезист полностью удаляют, после чего проводят диффузию акцепторной примеси в образовавшиеся окна на глубину*хк*, формируя *p*-область. В результате образуется коллекторный *p*-*n* переход, обеднённая область которого ограничена двумя жирными линиями, а металлургическая граница между *p*- и *n*-областями обозначена линией пунктирной (рис.Т2а). После этого поверхность пластины покрывают плёнкой диоксида кремния и вновь проводят фотолитографию, позволяющую вскрыть окна (несколько меньшие по размерам, чем в предыдущем случае) под диффузию донорной примеси на глубину *х*э. В результате образуется низкоомная *n****+*-**область эмиттера с концентрацией примеси ещё более высокой, чем у подложки, и образуется эмиттерный переход, также показанный двумя жирными линиями и пунктирной линией металлургической границы между областями эмиттера и базы. Металлургические границы эмиттерного хэ и коллекторного *хк*переходов (рис.Т2а и Т2в) проходят по точкам, в которых *N*ДЭ(*x*Э)= *N*АБ(*x*Э) и *N*АБ(*х*К)=*N*ДК(*х*К). Здесь *N*ДЭ, *N*ДК – концентрации доноров в области эмиттера и коллектора соответственно, *N*АБ - концентрация акцепторов в области базы; *х*К, *х*Э – глубина диффузии примеси, формирующей область коллектора и эмиттера соответственно. Технологическая ширина базы *W*Б= *хК-хЭ*, и для маломощных и высокочастотных БТ не превышает 0,15мкм. Физическая ширина базы http://ok-t.ru/mydocxru/baza1/817313026441.files/image057.png равна расстоянию между границами обеднённых слоёв эмиттерного и коллекторного переходов и потому меньше технологической ширины.

Следующей операцией является создание контактных площадок и межсоединений. Хороший омический контакт должен иметь сопротивление близкое к нулю и симметричную линейную ВАХ в соответствии с законом Ома. Если наносить металлизацию непосредственно на n-область эмиттера, то получается *барьер Шоттки,* обладающий вентильными (выпрямительными) свойствами. В случае же сильного легирования, при котором получают n**+**-тип проводимости, толщина области пространственного заряда (обеднённой области) барьера на границе «металл- n**+-**полупроводник»становится настолько малой, что через него возможно туннелирование носителей заряда, что позволяет получить требуемые характеристики контакта. Именно поэтому подложку и область эмиттера сильно легируют.

Для создания планарных омических контактов и межсоединений на верхней поверхности структуры пластина вновь окисляется и проводится фотолитография, позволяющая вскрыть окна под омические контакты базы и эмиттера. Затем на верхней поверхности пластины осуществляется *металлизация*путём нанесения на поверхность пластины сплошной металлической плёнки, например, алюминия методами термического испарения или катодного распыления. По металлизации проводится фотолитография, в ходе которой убирается лишний металл и остаются контактные площадки базы и эмиттера (косая штриховка на рис.Т2а, Т2б, Ме –означает *металл* на рис.Т2а).

На заключительной стадии пластина разрезается на отдельные кристаллы, к контактным площадкам ультразвуковой сваркой привариваются тоководы, после чего кристалл помещают в корпус, снабжают внешними выводами, герметизируют, окрашивают и маркируют. Существуют также *бескорпусные транзисторы*, предназначенные для создания различных *микросборок*. Защита от внешней среды таких транзисторов достигается нанесением на кристалл полимерного покрытия.

Если необходимо создать интегральную микросхему, то транзисторы, сформированные на подложке, соединяют согласно принципиальной схеме, при этом в качестве резисторов используют базы транзисторов, у которых сравнительно высокие сопротивления вследствие низкого уровня их легирования, в качестве диодов – эмиттерный и коллекторный переходы, в качестве ёмкостей – барьерные или диффузионные ёмкости p-n переходов.

Если имеет место прямое смещение эмиттерного перехода и происходит, как следствие, процесс диффузии электронов (обозначены как http://ok-t.ru/mydocxru/baza1/817313026441.files/image058.png ) из эмиттера в базу, то, как следует из рис.Т2а, в каком бы направлении ни двигались электроны – они попадают в поле коллекторного перехода, чья площадь существенно больше площади эмиттерного перехода. Инжектированные в базу электроны движутся не только в вертикальном, но и в боковых направлениях. Однако, поскольку в вертикальном направлении толщина базы существенно меньше, чем в горизонтальном направлении, то краевыми эффектами можно пренебречь и учитывать движение электронов в области базы, непосредственно расположенной под эмиттером. Данную часть базы называют *активной*, а остальную часть базы, с которой непосредственно соединены контактные площадки – *пассивной.*Отсюда следует, что *p-n* переходы в первом приближении можно считать плоскими, и для анализа процессов, происходящих в БТ, рассматривать одномерную модель его структуры (выделена цветом на рис. Т2а). Влияние пассивной базы можно учесть, вводя в схему замещения БТ резистор, чьё сопротивление равно объёмному сопротивлению пассивной области базы.

Одномерные структуры кристаллов транзисторов и условные их обозначения на схемах приведены на рис. Т3. Кружками обозначены внешние выводы транзистора, с помощью которых он соединяется (как правило, посредством пайки) с остальными компонентами усилительного устройства. Пунктирными линиями указаны металлургические границы между примесными областями, косой штриховкой обозначены границы эмиттерного (1) и коллекторного (2) переходов.

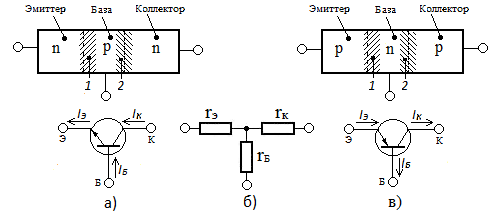


Рис.Т3. Структуры кристаллов, схема замещения и условные обозначения *p-n-p*и*n-p-n* биполярных транзисторов

Поскольку, как отмечалось ранее, концентрация примеси в области эмиттера много больше, чем в области базы, поэтому эмиттерный переход несимметричен и, в основном, сосредоточен в низколегированной области базы (рис.Т2в) (см. также рис.4). Физическая область базы формируется предельно тонкой, её толщина должна быть много меньше *диффузионной длины*, с тем, чтобы носители, попавшие в базу и диффундирующие в ней, не успевали рекомбинировать (диффузионная длина – это расстояние, на котором концентрация диффундирующих носителей уменьшается в *е* раз вследствие процессов рекомбинации).

Приложение напряжения к *p-n* переходу вызывает протекание по нему тока, это даёт основание в схемах замещения представлять переход в виде резистора. Однако, поскольку связь между током перехода и приложенным к нему напряжением нелинейная, то сопротивление такого резистора должно быть дифференциальным и находится через приращения токов и напряжений относительного некоторого постоянного их значения. Что касается области базы, то она должна быть представлена резистором с постоянным сопротивлением, поскольку речь идёт об объёме полупроводника между коллекторным и эмиттерным переходами. Резистивная схема замещения БТ представлена на рис.Т3б, где *rэ, rк, rб* – дифференциальные сопротивления эмиттерного, коллекторного переходов и объёмное сопротивление области базы соответственно.

На рис.Т3 также указаны направления токов, проходящих по выводам БТ, а именно, тока коллектора *IК,* тока эмиттера *IЭ* и тока базы *IБ* для активного режима, который будет рассмотрен далее.