ВВЕДЕНИЕ

В последнее время p-i-n- диод стал основным полупроводниковым элементом высокоскоростных СВЧ-модуляторов. Это связано с рядом преимуществ p-i-n- диодов по сравнению с применяемыми ранее варакторными диодами.

При прямом смещении p-i-n- структуру обычно представляет собой активное сопротивление. При обратном смещения ее можно представить в виде последовательно соединенных сопротивления и емкости. Резкое изменение импеданса полупроводниковой структуры p-i-n- диода и, следовательно, импеданса модулятора происходит вблизи точки нулевого смещения. При прямом смещении, начиная с некоторой величины Iпр, импеданс слабо зависит от тока. В обратносмещенном состоянии емкость базы диода на единицу площади относительно мала и не зависит от напряжения смещения. Поэтому характеристики модулятора в обоих состояниях смещения на диоде выходят на насыщение и почти не зависят от параметров управляющего сигнала. Вследствие этого колебания мощности падающего СВЧ-сигнала и температуры не приводят к значительным изменениям характеристик модулятора. Для варакторных диодов характерно плавное изменение импеданса, и характеристики СВЧ-модуляторов с такими диодами в существенной степени зависят от напряжения смещения. Поэтому при использовании варакторных диодов должны предъявляться повышенные требования к стабильности параметров управляющего сигнала. Колебания мощности СВЧ-сигнала и температуры влияют на характеристики таких модуляторов в большей степени, чем модуляторов на p-i-n- диодах. Кроме того, у варакторных диодов емкость на единицу площади полупроводниковой структуры и последовательное сопротивление при малых смещениях относительно велики, что создает трудности при конструировании модуляторов с малыми потерями СВЧ-мощности.

По уровню коммутируемой мощности p-i-n- диоды превосходят варакторные диоды. Так, в линиях связи диапазона частот 10-20 ГГц типичное значение мощности СВЧ-сигнала на выходе модуляторов на диодах Шотки не превышает 100 мВт. Замена диода Шотки p-i-n- диодом позволяет поднимать уровень выходной мощности фазового модулятора при сохранении прежней скорости передачи информации.

Полупроводниковые p-i-n- диоды используются в аппаратуре, вырабатывающей электромагнитные колебания диапазона сверхвысоких частот (СВЧ), излучающей их в окружающее пространство в виде радиоволн и принимающей и преобразующей эти волны с последующим использованием преобразованного сигнала для управления исполнительными механизмами, а также для индикации и измерения радиосигналов.

Электромагнитные колебания диапазона СВЧ обладают рядом физических особенностей, благодаря которым они нашли применение в самых разнообразных направлениях науки и техники. Наиболее важно то, что эти волны по характеру распространения приближаются к световым волнам (обладают квазиоптическими свойствами) и способны проникать сквозь всю атмосферу, включая верхние ионизированные слои.

Диоды просты конструктивно, имеют малые габаритные размеры и массу, потребляют небольшую энергию, обладают высоким быстродействием и сравнительно недороги.

Повышение качества p-i-n- диода может быть связано с достижением более высоких параметров таких как, пробивное напряжение Vпроб при обратном смещении, прямой ток через диод Iпр, прямое и обратное сопротивление потерь τпр и τобр. Такая попытка проведена в данной дипломной работе.

**1 Физика и технология p-i-n- диодов для**

**высокочастотных применений**

**1.1 Физические явления в переключательных p-i-n- диодах**

**1.1.1 Вольт-амперная характеристика**

При моделировании процессов протекания тока в p-i-n- диодах, как правило, используют следующие допущения: ступенчатость распределения примесей на границах p-i и p-n-переходов; независимость подвижности и времени жизни носителей заряда от их концентрации; одномерность геометрии диодов.

P-i-n- диоды, предназначающиеся для высокоскоростной модуляции СВЧ-мощности, обычно имеют тонкую базy: w<Li, где Li – диффузионная длина носителей заряда в i- области. Плотность, прямого тока колеблется от десятков до тысяч А/см2. В этом диапазоне плотностей тока коэффициенты инжекции переходов существенно отличаются от единицы, т.е. происходит инжекция основных носителей заряда из базы в низкоомные области p-i-n-структур. Это приводит к тому, что неравновесные носители заряда накапливаются не только в i- области, но и в контактных областях. В большинстве случаев заряд контактных областей значительно меньше заряда, накапливаемого в базе.. Однако рекомбинационные процессы в этих областях могут определять вид ВАХ p-i-n-диода.

Неидеальность переходов характеризуется добротностями Вp и Вn, которые являются сложными функциями параметров р - и n - контактных областей и напряжения на переходах. С увеличением напряжения добротность переходов падает. К снижению добротности приводит также нерезкость реальных p-i- и i-n - переходов и наличие в них значительных концентраций рекомбинационных центров.

В зависимости от соотношения между рекомбинационными токами в базе р-i-n - диода и в контактных областях на ВАХ р-i-n- диода можно выделить три типичных участка.

1) При малых плотностях тока коэффициенты инжекции р-i- и i-n - переходов близки к единице, преобладает рекомбинация в базовой области и ВАХ диода описывается зависимостью по Холлу[7,13,15,16,]

, (1)

где Iпр – прямой ток через диод;

Vпр – падение напряжения на диоде при прямом смещении;

q – заряд электрона;

k – постоянная Больцмана;

Т – температура.

2) По мере уменьшения добротности переходов с возрастанием прямого смещения на диоде становится существенной инжекция носителей заряда в контактные области. Когда рекомбинационный ток в этих областях становится равным рекомбинационному току в базе, ВАХ р-i-n- диода можно представить в виде[15]

 (2)

Крутизна ВАХ на этом участке выше, чем на холловском.

3) При дальнейшем росте плотности тока, когда рекомбинация в низкоомных р- и n- областях начинает преобладать над рекомбинацией в базовой области, крутизна ВАХ p-i-n- диода уменьшается, и связь между током и напряжением на диоде принимает вид [13,15]

 (3)

где V0 - сумма падений напряжения на контактах и разности потенциалов Дембера.

Следует отметить, что второй участок ВАХ имеет большую протяженность у диодов с меньшим значением отношения w/Li, у р-i-n- диодов с w/Li ~1 такого участка ВАХ практически не наблюдается.

На рис.1 показана зависимость тока от напряжения быстродействующего переключательного p-i-n- диода, предназначенного для высокоскоростной модуляции СВЧ-мощности в цифровых системах связи [9]. Толщина базы диода около 2 мкм при диаметре p-i-n- структуры 30-35 мкм. На ВАХ не наблюдается переход к квадратичному участку даже при плотности тока (4-6)\*103 А/см2, что может свидетельствовать о высокой добротности переходов и сравнительно большом времени жизни носителей заряда в i-области.

# Общий накопленный заряд QS есть сумма зарядов в i -области

и в p- и n- областях. Для симметричной модели диода

, (4)

где Qi - накопленный заряд в базе диода;

QC - накопленный заряд в контактной области.

Уравнение непрерывности для заряда, являющееся основой метода, в этом случае имеет вид

, (5)

где τi – время жизни носителей заряда в i- области при высоком уровне инжекции;

Рис. 1. ВАХ быстродействующего переключательного p-I-n- диода.

Рис. 2. Стационарное распределение носителей и накопленных зарядов в базовой и контактных областях для симметричной модели p-i-n- диода.

τС – время жизни носителей заряда в контактных областях.

Распределение носителей заряда в базовой и контактных областях в стационарном состоянии для симметричного случая показано на рис. 2. Со-

гласно распределению Больцмана концентрация носителей в I – области на границе с р – областью связана с их концентрацией в p- области соотношением

, (6)

где р0 – концентрация равновесных дырок в р- области;

V0p-I – контактная разность потенциалов на р –I – переходе;

Vp-I –внешнее напряжение на p-i- переходе;

pi, ni – концентрация электронов и дырок в базе.

Аналогичное соотношение выполняется и на I-n- переходе. Выражение (6) справедливо до тех пор, пока в р- области выполняется условие низкого уровня инжекции. С ростом инжекции в (6) p0 необходимо заменить на p0+nC(p), где nC(р) – концентрация электронов, инжектированных в р-область, и зависимость (6) усложняется.

Для p-I-n- диодов с w<Li при J< 103 А/см2 падением напряжения на базе в стационарном состоянии можно пренебречь [4,7,14]. В этом случае для симметричной модели падение напряжения на каждом из переходов равно

 , где Vp-n – общая контактная разность потенциалов диода.

Учитывая (6), а также полагая одинаковую степень легирования р- и n- областей (p0=n0=NC), распределение носителей заряда в I –области может быть записано в виде (см. рис. 2)

, (7)

где NC – концентрация доноров(акцепторов) в контактных областях;

Li – диффузионная длина носителей заряда в I- области;

# В контактных областях быстродействующих переключательных

p-i-n- диодов обычно выполняется условие низкого уровня инжекции. Поэтому распределение концентрации неосновных носителей описывается экспоненциальным законом

, (8)

где w – толщина базы диода с учетом слоев обеднения. При прямом смещении этой поправкой можно пренебречь даже для диодов с очень тонкой базой. Замена w\* на w в (8) приводит к ошибке не более 10 % [5].

Выражение для стационарных зарядов Qi0 и QC0 получается интегрированием (7) и (8). Используя уравнение непрерывности (5) в стационарном случае, можно получить соотношения между этими зарядами и напряжением на диоде [9,10]

QC0 = A\*q\*NC\*LC\*V2 , (9)

, (10)

, (11)

где А – площадь диода;

w – толщина базовой области p-I-n- диода.

**1.1.2 Переходные процессы при подаче прямого смещения**

В случае высокого уровня инжекции прямой переходный процесс в p-i-n- диоде можно условно разделить m три фазы. Первая фаза - установление квазинейтральности в базе диода. В течение этой фазы ток в базе определяется в основном дрейфом носителей заряда. Вторая фаза – фаза, в которой преобладает амбиполярная диффузия носителей в квазинейтральной базе. Третья фаза - стационарное распределение носителей. Уравнение непрерывности для заряда в базовой области диода с учетом утечек через переходы для симметричной модели диода (b=1, Bp=Bn=BД ) может быть записано в виде [16]

, (12)

где QN - заряд ионизированных примесей в базе;

BД – добротность переходов.

Для p-i-n- диодов с контактными областями бесконечной протяженности влиянием металлических контактов на добротность переходов можно пренебречь. В этом случае эффективное время жизни носителей заряда τэ определяется выражением [12]

, (13)

где Dс - коэффициент диффузии носителей в контактной области. При использовании параметра τэф уравнение (5) упрощается:

 (14)

Если с момента переключения в состояние с прямым смещением через диод протекает постоянный ток Iпр, решение уравнения (14) имеет вид

 (15)

В стационарном состоянии QS = Inp\*τэф. Эффективное время жизни может быть определено из измерений величины накопленного заряда при данной величине прямого тока.

Градиенты концентраций диффундирующих носителей заряда для симметричной модели диода определяются из условия

 (16)

Два диффузионных потока квазинейтральной электронно-дырочной плазмы, движущиеся навстречу друг другу от краев базы, встречаются в центре базы в момент

tC = w2/8\*D, (17)

где D = 2\*b\*Dp/b+1 – амбиполярный коэффициент диффузии носителей заряда.

Если tC << τэф, то в период времени до встречи диффузионных фронтов рекомбинацией носителей заряда можно пренебречь. В этом случае в промежутке времени t`C ≤ t ≤ tC (tC - время установления квазинейтральности заряда в базе) для концентрации дырок на границах базы можно записать

 (18)

Для t >> tC распределение носителей заряда в базе можно считать однородным и

QS = A\*q\*w\*pi(0) (19)

Если пренебречь падением напряжения на i -области, то предполагая справедливость распределения Больцмана

Pi(0) = pi0\*exp(q\*Vp-i/k\*T),

где pi0 - равновесная концентрация дырок в i-области, из выражений (15), (18), (19) легко определить падение напряжения на диоде при переходном процессе.

1.1.3 Переходные процессы при переключении от прямого смещения к обратному

Процесс рассасывания накопленных носителей заряда при переключении диода в состояние с обратным смещением можно также характеризовать тремя основными фазами. Первая фаза - фаза квази-нейтралъности, в течение которой происходит обеднение носителями областей базы, прилегающих к границам p-i - и i-p- переходов. Вторая фаза - развитие областей объемного заряда, возникающих у границ базы и разрастающихся к ее центру. В этих областях ток ограничен объемным зарядом. Третья фаза - фаза переноса, в которой после смыкания областей объемного заряда из базы вытягиваются неравновесные электроны и дырки.

Процесс восстановления обратного сопротивления p-i-n- диода с учетом зарядов контактных областей может быть разделен на четыре фазы: фазу восстановления зарядов контактных областей, фазу квазинейтральности процесса восстановления заряда базы, фазу развития областей объемного заряда и фазу переноса.

Фаза восстановления зарядов контактных областей. В этот период ток поддерживается зарядом 2\*QC . Первыми от неосновных носителей заряда освобождаются слои, прилегающие к границам p-i-и i-n- переходов. Этот процесс подобен процессу в диодах с резким восстановлением [9]. Так как граничные концентрации носителей заряда в базе диода и контактных областях связаны между собой распределением Больцмана, то любое уменьшение концентрации неосновных носителей заряда в контактных областях сопровождается соответствующим уменьшением концентрации электронов и дырок в базе диода. Следовательно, в этот период времени наряду с зарядом контактных областей восстанавливается часть заряда i-области. Однако эта часть мала по сравнению с Qi0. Поэтому можно считать, что в течение этой фазы заряд Qi0 остается неизменным.

При расчете длительности фазы экспоненциальное распределение электронов и дырок в контактных областях аппроксимируется треугольным распределением (pиc. 3) с тем же значением QС0 и с той же концентрацией носителей заряда на границах. Длительность фазы определяется временем t1, за которое концентрация неосновных носителей заряда на границах переходов (x = ±w/2) становится равной нулю. Градиенты концентрации носителей заряда в момент t = t1 определяются токами Inp, и Iобр. За время t1 восстанавливается заряд 2\*ΔQC1, который легко получить из геометрических расчетов (pиc. 3). Приравнивая 2\*ΔQC1 к Iобр\*t1 можно получить трансцендентное уравнение для определения t1:

, (20)

где

,

Фаза квазинейтральности процесса восстановления заряда базы начинается с момента t1 и длится до момента возникновения областей объемного заряда t2. В этом период времени градиенты концентрации носителей заряда в базе и на границах переходов равны:

, (21)

где IC(t) - остаточный ток контактных областей.

Остаточный ток замедляет процесс восстановления заряда базы. При пренебрежении IC(t) время переключения и напряжение на диоде изменяется не более чем на 10 %. Поэтому для практических оценок можно использовать упрощенную модель переходного процесса, не учитывающую этот остаточный ток.

Распределение носителей заряда в базе p-i-n- диода в момент окончания фазы квазинейтральности может быть аппроксимирована либо трапецеидальным распределением (рис. 4,а), либо треугольным (рис. 4,6).

Рис.3. Распределение носителей и заряда в контактной области во время восстановления зарядов этой области.

Рис. 4. Восстановление заряда i-области при трапецеидальном (а) и треугольном (б) распределении носителей заряда.

Трапецеидальное распределение реализуется при условии

, (22)

где l - длина верхнего основания трапеции.

В этом случае из геометрических расчетов нетрудно определить момент окончания фазы t2, для трапецеидального распределения:

 (23)

При l<0 реализуется аппроксимация треугольным распределением и:

 (24)

Фаза развития областей объемного заряда. При t >t2 условие квазинейтральности в базе не может выполняться для всей i- области. У p-i- и i-n- переходов образуется области объемного заряда, которые разрастаются в направлении к середине i -области. При этом трапецеидальное распределение переходит в треугольное (рис. 4а) в момент

 (25)

Ширину областей объемного заряда характеризуют переменной координатой S(t) , которую также можно определить из геометрических расчетов (рис. 5,а,б):

дня трапецеидального распределения

 (26)

треугольного распределения

 (27)

В выражениях (26) и (27) момент окончания фазы развития областей объемного заряда t3 и остаточный заряд в базе в момент t2 определяются выражениями

 (28)

 (29)

В момент t3 происходит смыкание областей объемного заряда. К этому времени из базы экстрагируется основная часть накопленного заряда.

Фаза переноса. В этой фазе из базы удаляются электроны и дырки, находящиеся в областях объемного заряда [15]. Концентрацию их можно оценить из выражения для тока, ограниченного объемным зарядом:

 (30)

К моменту начала фазы в большей части базы дрейфовая скорость носителей заряда выходит на насыщение (vдр≈vт ≤ см/с). Поэтому длительность фазы переноса определяется временем их пролета с максимальной скоростью расстояния, равного половине толщины базы:

t4-t3=w/2\*vт (31)

При t≥t4 база р-i-n- диода свободна от подвижных носителей заряда и может быть представлена независящей от напряжения емкостью Сi=ε\*ε0\*A/w Обратный ток не может поддерживаться постоянным и уменьшаться до нуля.

Напряжение на диоде. В первых двух фазах напряжение на диоде изменяется от Vпр до Vобр(t2). Последняя величина невелика и определяется сопротивлением контактных областей и базы в момент t=t2. Для фазы развития областей объемного заряда при μ=const можно записать [15]

 (32)

где S=S(t) и определяется (26) либо (27).

Выражение для напряжения в фазе переноса можно получить интегрированием напряженности поля по всей базе. Однако необходимость учета тока смещения значительно усложняет эту задачу, которая упрощается, если для оценки Vобр.B этот период времени воспользоваться линейной аппроксимацией Vобр(t).Анализ показал, что в фазе переноса напряжение на диоде возрастает от Vобр до 3/2 Vобр при t=t4. Поэтому можно записать

 (33)

Такая аппроксимация вполне оправдана, так как t4-t3<<t3

Для t>t4 напряжение на p-i-n- диоде увеличивается от Vобр(t4) до напряжения источника тока с постоянной времени τн=Rн\*ci,

где Rн – внутренне сопротивление источника тока,

сi – емкость базы диода.

В ряде случаев, например, при оптимизации формы импульса тока управления переключательными р-i-n диодами и при анализе процессов взаимодействия p-i-n- диодов со схемой управления не требуется знание детального распределения носителей заряда

в i- области. В этих случаях диод рассматривается как элемент цепи (емкость), в котором процесс накопления и рассасывания заряда описывается уравнением (14) [5,10,15,16].

**1.2 Технология быстродействующих p-i-n- диодов**

**1.2.1 Структура р-i-n- диода и требования к параметрам**

**полупроводникового материала [7,9,12,15,16]**

Быстродействующие переключательные p-i-n- диоды представляют собой собранные в корпуса или держатели р-i-n структуры с тонкой (от 1 до 10 мкм) высокоомной ( ρ > 10 Ом\*см) базовой i-областью n- или p-типа проводимости. Материалом базовой области обычно являются эпитаксиальные пленки кремния. В качестве низкоомных р- и n-областей используются низкоомные подложки кремния, тонкие эпитаксиальные, диффузионные или ионно-легированные слои. Площадь таких p-i-n- структур обычно составляет от 2\*10-7 до 8\*10-5 см2

Для минимизации вклада в τпр и τобр сопротивлений n- и p- областей толщину и удельное сопротивление последних стремятся делать минимальными. Кроме того, с уменьшением ρn и ρp уменьшается сопротивление контактов к этим областям.

При эпитаксии вследствие автолегирования и диффузии примеси из подложки на границе раздела между низкоомной и высокоомной областями пластины образуется переходной слой с переменной концентрацией примеси. Толщина его может быть сравнима с размерами базы диода. Аналогичный слой образуется при создании диффузионного или эпитаксиального переходов в высокоомной пленке.

Неполное обеднение этих слоев при обратном смещении приводит к увеличению обратного сопротивления потерь диодов. При прямом смещении из-за наличия переходных слоев уменьшаются коэффициенты инжекции переходов. Поэтому при создании диодных структур принимаются специальные меры к увеличению резкости переходов.

Для того, чтобы полное обеднение базовой области диода и переходных слоев было получено при небольшом напряжении обратного смещения, удельное сопротивление i -слоя должно быть максимально большим.

**1.2.2 Методы создания p-i-n- структур**

Эпитаксиальные пленки Si для быстродействующих переключательных диодов выращивают разложением SiCl4 [12], SiH4 [10],а также методом молекулярно-лучевой эпитаксии [16,9]. Выращивание обычно проводят на подложках n- типа проводимости с удельным сопротивлением 0,001- 0,003 Ом \*см. При эпитаксии для уменьшения толщины переходного слоя между низкоомной подложкой и высокоомной пленкой принимают меры, снижающие эффект автолегирования. Для этой цели перед эпитаксиальным выращиванием обратную сторону подложки маскируют нелегированным материалом, а процесс эпитаксии проводят в два этапа. На первом этапе при высокой температуре выращивают тонкий (около 0,4 мкм) слой нелегированного Si [10], на втором при более низкой температуре этот слой доращивают до необходимой толщины. При пиролизе SiH4 в качестве маски может быть использован слой SiO2 для SiCl4 предпочтительнее маскирование высокоомным слоем Si. Типичные значения толщины переходных слоев в пиролитических эпитаксиальных структурах, используемых для создания БПД, лежат в пределах 0,4-0,6 мкм.

Молекулярно-лучевая эпитаксия, проводимая в ультравысоком вакууме при сравнительно низкой температуре (950-1050°С), позволяет уменьшить толщину переходного слоя примерно до 0,2 мкм.

Обычно p-i- переход создается низкотемпературной (Т=860-880°С) диффузией бора на глубину 0,15-0,22 мкм. При изготовлении р-i-n- структур по технологии обращенной мезаструктуры подложку стравливают до -толщины примерно 10 мкм. При создании прямой мезаструктуры подложку также утончают.

В качестве контактов к сильнолегированным областям р-i-n- структур используются тонкие слои Cr, Ti и Pd2Si. Контакты формируются в виде многослойных систем Ti-Au [15,16], Cr-Pd-Au [9,10]. Значения среднего удельного сопротивления этих контактов ρs=(ρsp+ρsp)/2 для ρp,ρn≤ 0,005 Ом\*см сравнимы и примерно пропорциональны сопротивлению p- и n- областей. При ρn=0,0015 Ом\*см и ρp = 0,001 Ом\*см в диапазоне частот 700-1700 МГц для всех типов контактов ρs<10-6Ом\*см-2.

Адгезия Ti и РdSi4 к Si лучше, чем Cr. Кроме того, для хромового контакта наблюдается аномальная зависимость сопротивления от плотности прямого тока [7]. Недостатком Ti является его взаимодействие с травителем для кремния. Вследствие этого при формировании мезаструктуры качество титанового контакта может существенно ухудшаться.

Типичные варианты р-i-n- мезаструктур для быстродействующих переключательных диодов показаны на pиc.5.

Рис. 5. Варианты исполнения p-i-n- структур для быстродействующих переключательных диодов.

Для получения мезаструктуры, показанной на рис.5,а, после диффузии бора в i -слой подложку сошлифовывают примерно до 10 мкм, создают металлические контакты и с помощью фотолитографии формируют ме-заструктуры по диаметру верхнего контакта (около 70 мкм). До окончательного диаметра (17-20 мкм) дотравливают мезаструктуру после сборки диода. Диодная структура (рис.5,6) получена по стандартной технологии обращенной мезаструктуры с интегральным теплоотводом. На рис.5,д показана p-i-n- структура в виде прямой мезаструктуры с балочными выводами. В такой конструкции металлический контакт расположен в непосредственной близости от мезаструктуры, что позволяет уменьшить вклад сопротивления подложки в полное сопротивление диода.

Технология полностью эпитаксиальных p-i-n- структур [12]. На низкоомной, ориентированной в плоскости (100) n-подложке выращиваются последовательно р- слой толщиной около 5 мкм с ρp≤ 0,001 Ом\*см, нелегированный i- слой (от 1 до 15 мкм) и тонкий (~1 мкм) n- слой ρn ≤ 0,0015 Ом\*см. Такая структура эпитаксиальных слоев позволяет, используя селективный травите ль, полностью стравить n- подложку и получить однородные по толщине обращенные мезаструктуры с низким удельным сопротивлением p- и n-областей (рис. 5,г).

Вариант технологии изготовления прямой мезаструктуры для БПД подобен технологии создания p-i-n- структуры ограничительного диода. В этом варианте высокоомный i- слой и низкоомный n- слой последовательно наращиваются на низкоомной подложке p- типа проводимости.

Для получения диодных структур с поверхностью, пассивированной термическим SiO2, на эпитаксиальный i- слой осаждается Si3N4 фотолитографией по Si3N4 формируются прямые мезаструктуры, затем проводится термическое окисление боковой поверхности этих структур, удаляются остатки Si3N4 и в открывшихся, окнах создаются диффузионные р-i - переходы.

Существует технология, которая заключается в создании p-i-n- структуры одновременной мелкой диффузией доноров и акцепторов в высокоомную тонкую пленку Si. Технологическая схема этого метода представлена на рис. 6. Исходные пластины представляют собой эпитаксиальные p-i- (или n-i-) –структуры. Всю подложку толщиной 200-400 мкм стравливают химически в потоке газа либо электрохимически. Эпитаксиальную пленку утончают до 2-6 мкм. Диффузию B и P проводят одновременно из боро- и фосфоросиликатных стекол, нанесенных на противоположные стороны пленки. После кратковременной диффузии (5-15 мин при 1100°С), при которой p-i- и i-n- переходы формируются на глубине от 0,5 до 1,5 мкм от поверхности, остатки стекол стравливают и на обе стороны напыляют металлические контакты типа Ti-Au.

## Этот метод позволяет применить элементы планарной технологии, при этом SiO2 используется в качестве диффузионной маски. Общий вид p-i-n-мезаструктуры, выполненной по планарной технологии, показан на рис.5,г.

Для получения высокой скорости переключения СВЧ-мощности разработаны [9] плананарные диоды "сотовой" структуры с диаметром р-i- перехода около 5 мкм и толщиной i -области около 1 мкм (рис. 5,е). В таких структурах p-i - переход формируется селективной имплантацией ионов бора в высокоомную эпитаксиальную пленку Si. Маской при имплантации служит слой SiO2.

В некоторых случаях для уменьшения времени жизни носителей заряда p-i-n - структуры легируют золотом.

Рис. 6. Технологическая схема изготовления p-i-n- структур с диффузионными n- и р- областями.

**1.2.3 Конструкции р -i -n- диодов**

Для высокоскоростной модуляции СВЧ, используются как корпусные, так и бескорпусные конструкции р-i-n- диодов (рис. 7). Монтаж диодов в кварцевый и металлокерамический корпуса обычно применяют для диапазона частот до 55 ГГц. На этих частотах могут быть использованы и металлосапфировые корпуса. Для более высоких частот, где требуются малые значения СК, диоды обычно монтируют на штифте с одной или двумя металлизированными кварцевыми опорами. При сборке "сотовой" структуры чип с рядом малых р-i-n- структур помещается в держатель в виде волноводной вставки уменьшенного сечения, контакт к структуре осуществляется тонкой иглой из золото-никелевого сплава.

Пассивация p-i-n- структур лаками и SiO2 несколько ухудшает параметры диодов на СВЧ. Для избежания этого бескорпусные диоды монтируют в волноводном. модуле, который герметизируется майларовым стеклом и заполняется инертным газом.

Для оптимизации параметров СВЧ-модуляторов в каждом интервале частот требуются вполне определенные величины СК и LS. Емкость СК можно регулировать в широких пределах выбором геометрических размеров корпуса и кварцевых опор. Индуктивность LS также можно варьировать изменением длины и количества выводов (монтажные лент) от верхнего контакта мезаструктур.

Рис. 7. Способы сборки быстродействующих переключательных р-i-n- диодов:

а) в кварцевый корпус, б) в металлокерамический корпус, в,г) на штифтах с одной и двумя металлизированными опорами, д) прямая мезаструктура с балочными выводами, е) "сотовая" структура.