## Тема 1: Физические основы полупроводниковых приборов

## Полупроводниковые материалы

Все твердые вещества по своим электрическим свойствам разделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Полупроводники занимают по электропроводности промежуточное положение между металлами (проводниками электрического тока) и диэлектриками. Удельное электрическое сопротивление проводников составляет ρ = 10-4 Ом см, полупроводников - ρ = 10-4 - 1010 Ом см, диэлектриков - ρ = 1010 Ом см и выше.

Для изготовления полупроводниковых приборов в настоящее время используют помимо германия и кремния некоторые химические соединения, например арсенид галлия, окись титана, антимонид индия, фосфид индия и др. Наиболее широко применяют кремний и германий.

Германий и кремний - элементы четвертой группы периодической системы Д.И. Менделеева, т.е. являются четырехвалентными элементами. В валентной зоне каждого атома германия и кремния имеется по четыре валентных электрона. Германий и кремний имеют атомные кристаллические решетки. Связь между атомами в таких решетках парноэлектронная или ковалентная. Каждый атом в них связан с соседним двумя электронами - по одному от каждого атома. Схематическое изображение кристалла германия на плоскости показано на рис.1. Каждый атом в монокристалле германия окружен четырьмя соседними атомами, с которыми он связан парноэлектронными связями. В результате валентная оболочка каждого атома имеет восемь электронов, т.е. оказывается полностью заполненной. В таком кристалле все валентные электроны связаны между собой прочными парноэлектронными связями. Свободных электронов, которые могли бы участвовать в переносе зарядов, нет.

Рисунок 1

Чистые полупроводники при нуле абсолютной температуры (Т = 0ºК) являются идеальными диэлектриками.

Однако в нормальных условиях, при комнатной температуре, некоторые валентные электроны кристаллической решетки получают энергию, достаточную для разрыва ковалентной связи, т.е. для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Вследствие разрыва одной парноэлектронной связи образуются два носителя заряда: электрон и дырка.

Электрон, как известно, является носителем элементарного отрицательного заряда. При разрыве парноэлектронной связи электрон отрывается от атома, после чего одна связь в атоме оказывается незаполненной - свободной.

Незаполненная электронная связь в кристаллической решетке полупроводника называется дыркой. Дырка обладает положительным зарядом, по абсолютной величине равным заряду электрона, и, следовательно, является носителем положительного заряда.

Дырка может быть заполнена электроном, оторвавшимся от соседнего атома. Процесс заполнения электроном дырки называется рекомбинацией. При этом в соседнем атоме на месте ушедшего электрона образуется новая дырка.

В обычных условиях, т.е. при комнатной температуре, процесс возникновения пары электрон - дырка и рекомбинация происходят непрерывно. В результате устанавливается динамическое равновесие, при котором в чистом полупроводнике концентрация электронов равна концентрации дырок.

Наличие носителей зарядов в полупроводнике объясняет его проводимость. Проводимость чистого полупроводника, обусловленная электронами и дырками, возникающими только в результате разрыва парноэлектронных связей, называется собственной проводимостью.

При отсутствии внешнего электрического поля электроны и дырки перемещаются в объеме полупроводника беспорядочно. Если же к полупроводнику приложить напряжение, то в нем возникает упорядоченное движение электронов в одном направлении и дырок в другом - противоположном направлении. Через полупроводник протекает ток, который равен сумме токов электронного In и дырочного Ip, т.е.

I = In + Ip. (1.1)

Ток, протекающий в полупроводнике при равновесной концентрации носителей зарядов (электронов и дырок), называется дрейфовым током или током проводимости.

Плотность дрейфового тока определяет удельную электропроводность полупроводников σ. Так, для германия удельная электропроводность

σGe = 2 10-2 Ом-1 см-1,а для кремния

σSi = 4 10-6 Ом-1 см-1,т.е. σGe >>σSi.

С повышением температуры удельная электропроводность увеличивается по экспоненциальному закону.

Полупроводник без примесей называют собственным полупроводником или полупроводником і - типа. Он обладает собственной электропроводностью, которая, как было показано, складывается из электронной и дырочной электропроводности.

Если в полупроводнике имеются примеси других веществ, то дополнительно к собственной электропроводности появляется еще примесная электропроводность, которая в зависимости от рода примеси может быть электронной или дырочной.

Для получения полупроводника с электронной электропроводностью в чистый полупроводник - германий или кремний - вводят небольшое количество элемента пятой группы периодической системы элементов: сурьмы (Sb), мышьяка (As), фосфора (P). Их атомы взаимодействуют с атомами германия только четырьмя своими электронами (рис.2) образуя прочные парноэлектронные связи с четырьмя соседними атомами германия. Пятый валентный электрон, например атома мышьяка, в образовании парноэлектронной связи не участвует. Поэтому он оказывается слабо связанным со своим атомом и может быть легко оторван от него. В результате он превращается в свободный электрон, который может свободно перемещаться в объеме полупроводника, создавая электронную проводимость.

Атом мышьяка, потерявший один электрон, превращается в положительный ион, который оказывается неподвижным, так как он прочно удерживается в узле кристаллической решетки парноэлектронными связями.

Подвижные носители зарядов, концентрация которых в данном полупроводнике преобладает, называются основными носителями зарядов.

Элементы, атомы которых отдают свои электроны, создавая в полупроводнике избыток свободных электронов, называются донорами.

Обычно донорами для германия являются мышьяк и сурьма, а для кремния - фосфор и сурьма.

В полупроводнике с донорными примесями электроны являются основными носителями зарядов, а дырки - не основными.

Проводимость, обусловленная наличием в полупроводнике избыточных свободных электронов, называется электронной проводимостью.

Полупроводник, в котором основными носителями зарядов являются электроны, называется электронным полупроводником или полупроводником n - типа.

Для получения полупроводника с дырочной электропроводностью в кристалл чистого германия вводят примеси трехвалентных элементов: индий (In) и галлий (Ga) для германия; бор (В) и алюминий (Al) для кремния. При этом три валентных электрона, например индия, образуют три парноэлектронные связи с соседними атомами германия. В результате теплового движения электрон одного из соседних атомов германия может перейти в незаполненную связь атома индия. В атоме германия появится одна незаполненная связь - дырка (рис.3). Захваченный атомом индия, четвертый электрон образует парноэлектронную связь и прочно удерживается атомом индия. Атом индия становится при этом неподвижным отрицательным ионом.

Примеси, атомы которых захватывают и прочно удерживают электроны атомов полупроводника, называются акцепторными или акцепторами.

Проводимость, обусловленная наличием в полупроводнике избытка подвижных дырок, т.е. превышением их концентрации над концентрацией электронов, называется дырочной проводимостью или проводимостью р - типа.

Основными носителями зарядов в полупроводнике с акцепторной примесью являются дырки, а не основными - электроны.

Полупроводники, в которых основными носителями зарядов являются дырки, называются дырочными полупроводниками или полупроводниками р - типа.

Рисунок 2 Рисунок 3

Электрический ток в полупроводнике может быть вызван двумя причинами:

действием внешнего электрического поля;

неравномерным распределением концентрации носителей зарядов по объему полупроводника.

Направленное движение подвижных носителей зарядов под воздействием электрического поля называют дрейфом (дрейфовое движение), а под воздействием разности концентраций носителей зарядов - диффузией (диффузионное движение). Неравномерность концентрации зарядов в какой-либо части полупроводника может возникнуть под действием света, тепла электрического поля и др.

В зависимости от характера движения носителей зарядов различают соответственно дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках.

## Электронно - дырочный переход (p - n - переход)

Область на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности называется электронно - дырочным переходом или p-n - пе-реходом.

Пусть внешнее напряжение на переходе отсутствует. Так как носители зарядов в каждом полупроводнике совершают беспорядочное тепловое движение, то происходит их диффузия из одного полупроводника в другой. Из полупроводника n - типа в полупроводник р - типа диффундируют электроны, а в обратном направлении из полупроводника р - типа в полупроводник n - типа диффундируют дырки (рис.4, б). В результате диффузии носителей зарядов по обе стороны границы раздела двух полупроводников с различным типом электропроводности создаются объемные заряды различных знаков. В области n возникает положительный объемный заряд, который образован положительно заряженными атомами донорной примеси. Подобно этому в области р возникает отрицательный объемный заряд, образованный отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси.

а) б)

Рисунок 4

Между образовавшимися объемными зарядами возникают так называемая контактная разность потенциалов: uK = φn - φp и электрическое поле, направленное от n - области к p - области.

Как видно, в p-n - переходе возникает потенциальный барьер, который препятсвует диффузии основных носителей зарядов.

Высота потенциального барьера равна контактной разнице потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. Высота потенциального барьера возрастает при увеличении концентрации примесей в соответствующих областях, при этом толщина p-n - перехода d уменьшается. Для германия, например, при средней концентрации примесей uK = 0,3 - 0,4 В и d = 10-4 - 10-5 см, а при больших концентрациях - uК ≈0,7 В и d = 10-6 см. С увеличением температуры высота потенциального барьера уменьшается.

Одновременно с диффузионным перемещением основных носителей через границу происходит и обратное перемещение носителей под действием электрического поля контактной разности потенциалов. Такое перемещение не основных носителей зарядов называется дрейфовым.

При отсутствии внешнего электрического поля через p-n - переход протекают два тока: ток диффузии и ток дрейфа.

Ток диффузии и ток дрейфа через p-n - переход протекают навстречу друг другу и взаимно компенсируются. Суммарный ток через p-n - переход равен нулю.

При образовании контактной разности потенциалов по обе стороны границы раздела полупроводников образуется слой с пониженной концентрацией основных носителей зарядов. Он обладает повышенным сопротивлением и называется запирающим слоем. Толщина его несколько микрон.

Внешнее напряжение U, приложенное плюсом к p - области p-n - перехода, а минусом к n - области, называется прямым напряжением Uпр.

Если к p-n - переходу приложено внешнее прямое напряжение Uпр, то создаваемое им внешнее электрическое поле Eпр оказывается направленным навстречу электрическому полю p-n - перехода -Eк. В результате этого высота потенциального барьера понижается на величину внешнего напряжения. Одновременно уменьшается толщина запирающего слоя (dпр < d) и его сопротивление в прямом направлении становится малым. Так как высота потенциального барьера понижается, возрастает диффузионный ток, так как большее число носителей зарядов может преодолеть пониженный барьер. Ток дрейфа при этом почти не изменяется, так как он зависит главным образом от числа не основных носителей, попадающих за счет своих тепловых скоростей на p-n - переход из p - и n - областей.

Рисунок 5

При прямом напряжении Iдиф > Iдр и поэтому полный ток через переход т.е. прямой ток, уже не равен нулю:

Iпр = Iдиф − Iдр > 0. (1.2)

Ток, протекающий через p-n - переход под действием приложенного к нему прямого внешнего напряжения, называется прямым током. Протекающий через p-n - переход прямой ток направлен из p - области в n - область.

Введение носителей зарядов через p-n - переход при действии прямого внешнего напряжения в область полупроводника, где эти носители являются не основными, называется инжекцией.

Внешнее напряжение, приложенное “плюсом" источника питания к n - области p-n - перехода, а “минусом“ к p - области называется обратным.

Рисунок 6

Под действием обратного напряжения Uобр через переход протекает очень небольшой обратный ток Iобр, что объясняется следующим образом. Поле, создаваемое обратным напряжением Eобр, складывается с полем контактной разности потенциалов Eк. В результате этого потенциальный барьер повышается, а толщина самого запирающего слоя увеличивается (dобр > d). Этот слой еще сильнее обедняется носителями, и его сопротивление значительно возрастает, т.е. Rобр >> Rпр.

Внешнее поле оттягивает основные носители зарядов от p-n - перехода. Перемещение свободных носителей зарядов через p-n-переход уменьшается, и при обратном напряжении, равном Uобр = 0,2В, ток диффузии через переход прекращается, т.е. Iдиф = 0, так как собственные скорости носителей недостаточны для преодоления потенциального барьера. Однако не основные носители будут перемещаться через p-n - переход, создавая ток, протекающий из n-области в p - область (обратный ток Iобр). Он является дрейфовым током (током проводимости) не основных носителей через p-n - переход. Значительное элек-трическое поле, создаваемое обратным напряжением, перебрасывает через p-n - переход любой не основной носитель заряда, появившийся в этом поле.

Выведение не основных носителей через p-n - переход электрическим полем, созданным обратным напряжением, называют экстракцией носителей зарядов.

Таким образом, p-n - переход пропускает ток в одном направлении - прямом, и не пропускает ток в другом направлении - обратном, что определяет вентильные свойства p-n - перехода.

Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) p-n - перехода называется зависимость тока, протекающего через p-n - переход от приложенного внешнего напряжения I = f (U) (рис.7).

Рисунок 7 - Вольт-амперная характеристика p-n - перехода: 1 - прямая ветвь; 2 - обратная ветвь при лавинном пробое; 3 - обратная ветвь при тепловом пробое

Прямую 1 и обратную 2 ветви ВАХ изображают в различном масштабе, поскольку в нормальном режиме работы p-n - перехода обратный ток на несколько порядков меньше прямого.

При достижении обратным напряжением некоторой критической величины Uпроб происходит резкое уменьшение сопротивления p-n - перехода. Это явление называется пробоем p-n - перехода, а соответствующее ему напряжение - напряжением пробоя. Различают электрический и тепловой пробой. Электрический пробой (участок АБВ характеристики) является обратимым, т.е. при этом пробое в переходе не происходит необратимых изменений (разрушения структуры вещества). Могут существовать два вида электрического пробоя: лавинный и туннельный.

Лавинный пробой объясняется лавинным размножением носителей за счет ударной ионизации и за счет вырывания электронов из атомов сильным электрическим полем. Этот пробой характерен для p-n - переходов большой толщины, получающихся при сравнительно малой концентрации примесей в полупроводниках. Пробивное напряжение для лавинного пробоя составляет десятки или сотни вольт.

Явление ударной ионизации состоит в том, что при более высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, ударяя в атомы кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые, в свою очередь, разгоняются полем и также выбивают из атомов электроны. Такой процесс усиливается с повышением напряжения.

Туннельный пробой объясняется явлением туннельного эффекта. Сущность последнего состоит в том, что при поле напряженностью более 105В/см, действующем в p-n - переходе малой толщины, некоторые электроны проникают через переход без изменения своей энергии. Тонкие переходы, в которых возможен туннельный эффект, получаются при высокой концентрации примесей. Напряжение, соответствующее туннельному пробою, обычно не превышает единиц вольт.

Области теплового пробоя соответствует на рис.7 участок ВГ. Тепловой пробой необратим, т.к он сопровождается разрушением структуры вещества в месте p-n - перехода. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима p-n - перехода. Это означает, что количество теплоты, выделяющейся в переходе от нагрева его обратным током, превышает количества теплоты, отводимой от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.

Рисунок 8 - Вольт-амперная характеристика p-n-перехода: 1 - при 20°С; 2 - при 50°С

На электропроводность полупроводников значительное влияние оказывает температура. При повышении температуры усиливается генерация пар носителей зарядов, т.е. увеличивается концентрация носителей и проводимость растет. При повышении температуры прямой и обратный ток растут. Для p-n - переходов на основе германия обратный ток возрастает примерно в 2 раза при повышении температуры на каждые 10°C; на основе кремния - при нагреве на каждые 10°C обратный ток увеличивается примерно в 2,5 раза. Прямой ток при нагреве p-n - перехода растет не так сильно, как обратный. Это объясняется тем, что прямой ток возникает главным образом за счет примесной проводимости, а концентрация примесей не зависит от температуры.

## Барьерная (зарядная) и диффузионная емкость p-n - перехода

Запирающий слой имеет высокое сопротивление и играет роль диэлектрика, а по обе его стороны расположены два разноименных объемных заряда +Qобр и − Qобр, созданные ионизированными атомами донорной и акцепторной примеси. Поэтому p-n-переход обладает емкостью. Эту емкость называют барьерной емкостью.

При прямом напряжении кроме барьерной емкости существует диффузионная емкость. Диффузионная емкость характеризует накопление подвижных носителей зарядов в p - и n - областях при прямом напряжении на переходе, когда носители зарядов в большом количестве диффундируют (инжектируют) через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в p - и n - областях.

Диффузионная емкость значительно больше барьерной.

Рисунок 9 - Зависимость емкости p-n-перехода от приложенного напряжения