## **1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ**

1.1. ТЕОРИЯ *p-n-* ПЕРЕХОДА

Исследование свойств веществ 4-6 группы периодической системы элементов Менделеева показало, что ряд веществ, таких как германий, кремний, селен, теллур, индий, мышьяк имеют проводимость, значительно зависящую от внешних факторов (температура, освещенность, электрические и магнитные поля, механическая нагрузка и т. д). Этот факт не позволяет отнести данные вещества к группе диэлектриков или проводников, поэтому они отнесены к группе полупроводников.

При контакте полупроводников *р-* и *n-*типа образуется электронно-дырочный переход с особыми свойствами. Этот тонкий переход под действием внешнего электрического поля обладает несимметричной проводимостью в разных направлениях, так как на границе их раздела возникает потенциальный барьер, образованный сконцентрированными здесь объемными зарядами.

При прямом включении полупроводникового диода основным носителям зарядов необходимо преодолеть потенциальный барьер, поэтому при малых прямых напряжениях полупроводниковый диод плохо проводит ток. Когда прямое напряжение превысит уровень потенциального барьера, диод почти не оказывает сопротивления, и прямой ток резко нарастает.

При обратном включении полупроводникового диода высота потенциального барьера растет, что приводит к торможению основных носителей зарядов, т. е. сопротивление диода значительно возрастает.

Из вышеизложенного следует, что при прямом включении диода и малых прямых напряжениях сопротивление диода велико. При прямом напряжении, которое выше потенциального барьера, сопротивление диода значительно падает. Полупроводниковый диод не обладает постоянным сопротивлением. Оно зависит от величины и полярности приложенного напряжения, следовательно, диод обладает дифференциальным сопротивлением, и его сопротивление является функцией приложенного напряжения

,

где - котангенс угла наклона касательной к кривой *ВАХ* в конкретной исследуемой точке (*рис*. 1.2).

Полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т. е. в прямом направлении он способен пропускать значительный ток и плохо проводит его в обратном направлении *рис*. 1.2.

Наряду с односторонней проводимостью полупроводниковый диод можно рассматривать и как конденсатор. Два проводника (*р-* и *n* области) разделенные диэлектриком (запирающий слой) являются конденсатором. Между *р*  и *n*  областями существует барьерная емкость, величина которой зависит от приложенного напряжения. Известно, что емкость плоского конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между токопроводящими пластинами. С ростом обратного напряжения ширина запирающего слоя диода растет, что приводит к падению его барьерной емкости. На этом принципе основана работа полупроводникового варикапа, основой которого является полупроводниковый диод.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИОДОВ

Учитывая нелинейность характеристики полупроводникового диода и зависимость его проводимости от внешних факторов, полупроводниковые диоды проявляют различные свойства и классифицируются следующим образом.

По материалам:

германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые.

По мощности:

маломощные, ток до 0,3 *А*;

средней мощности до 10 *А*;

вентили – свыше 10 *А*.

По выполняемым функциям диоды бывают:

Выпрямительные, детекторные, *СВЧ* и *ГВЧ* диоды, стабилитроны, обращенные диоды, туннельные диоды, варикапы, тензодиоды, магнитодиоды, динисторы, тиристоры и т.д.

1.3. ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД

Туннельный диод является полупроводниковым диодом на основе вырожденного полупроводника. При увеличении прямого напряжения ток нарастает, а затем в результате туннельного эффекта создается отрицательное дифференциальное сопротивление и *ВАХ* диода приобретает лямда - характеристику *рис*. 1.4.



Материалом туннельного диода является германий с очень высокой концентрацией свободных носителей зарядов в обоих зонах. Основными параметрами туннельного диода являются ток пика *Iп*, ток впадины *Iвп* и отношение тока пика к току впадины, т. е. *Iп* /*Iвп*. Туннельные диоды являются быстродействующими диодами и применяются в генераторах высокой частоты и переключающих приборах *рис*.1.4.

1.4. ВАРИКАП

Варикап - полупроводниковый прибор, в котором используется зависимость емкости *р-n*-перехода от обратного напряжения. В качестве полупроводника используют кремний. Основными параметрами варикапа являются: общая емкость *св*, которая фиксируется обычно при небольшом обратном напряжении порядка 2-5 *В*, коэффициент перекрытия по емкости: *кс* = *смак/смин*.

В основном варикапы изменяют свою емкость в пределах *пФ* и Они применяются в *УКВ* аппаратуре для автоподстройки частоты (*рис*. 1.5) и в параметрических усилителях с малым уровнем шумов.

Межэлектродную емкость следует учитывать в мощных полупроводниковых диодах, имеющих значительную площадь р-n-перехода, а, следовательно, и емкость, которая сказывается при высоких частотах питающей сети. В электронные схемы варикап включается встречно напряжению питания.



1.5. ОБРАЩЕННЫЙ ДИОД

Обращенный диод – это полупроводниковый прибор с критической концентрацией свободных носителей зарядов, в котором электрическая проводимость в обратном направлении выше, чем в прямом. Используется обращенный диод как стабистор – стабилизатор низкого напряжения.

 Обращенные диоды являются разновидностью туннельного диода, у которого ток пика *Iп* = 0, если к обращенному диоду приложить прямое напряжение *Uпр* ≤ 0,3 *В*. При обратном напряжении порядка несколько милливольт ток обращенного диода достигает нескольких миллиампер. Таким образом, обращенные диоды обладают вентильными свойствами в той области низких напряжений, при которых обычные полупроводниковые диоды не работают.

1.6. МАГТНИТОДИОД

В полупроводниковом магнитодиоде его проводимость зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Магнитодиоды изготовляют на основе германия или кремния с увеличенной толщиной p-n- перехода и высокой концентрацией свободных носителей зарядов.

При воздействии прямого напряжения *ВАХ* магнитодиода схожа с *ВАХ* обычного диода (*рис*. 1.7). Под воздействием магнитного поля электроны захватываются магнитными силовыми линиями, изменяют направление движения, что приводит к увеличению сопротивления магнтодиода.

Отечественная промышленность изготовляет магнитодиоды КД301, КД303, КД304 и т.д.

Чувствительность магнитодиодов к изменению магнитного поля значительно выше, чем у датчиков Холла. Применяются в клавиатуре вычислительных машин в качестве датчиков положения движущихся предметов, для считывания магнитной записи информации, для измерения и контроля различных неэлектрических величин. Схема на магнитодиодах может заменить коллектор в электродвигателе.



1.7. ТЕНЗОДИОД

Тензодиод - полупроводниковый диод, в котором под воздействием внешних механических сил и соответствующей деформации полупроводника изменяется его проводимость. В качестве тензодиодов обычно применяют туннельные диоды, у которых отдельные участки вольт-амперной характеристики существенно зависят от деформации рабочего тела диода. Коэффициент тензочувствительности диодов достигает сотен и даже тысяч единиц, в то время как у проволочных и фольговых тензодатчиков всего лишь единицы.

1.8. ФОТОДИОД

Представляет полупроводниковый диод с открытым *р–n-*переходом, при освещении которого в *р–n*-переходе возрастает число неосновных носителей зарядов, в результате чего увеличивается обратный ток фотодиода. Фототок зависит от интегральной чувствительности фотодиода *Si* и светового потока *Ф*. .

*ВАХ* фотодиода представлена на *рис*. 1.8.

Без включения нагрузки фотодиод может работать в двух режимах: короткого замыкания и холостого хода. В режиме короткого замыкания напряжение на диоде равно нулю, и ток в фотодиоде равен фототоку, т. е.

,

где *Ф* – световой поток; *Si* - фоточувствительность.

Таким образом, в режиме короткого замыкания существует прямая пропорциональная зависимость между световым потоком и фототоком.

В режиме холостого хода фотодиод создает на своих электродах напряжение – фото*ЭДС* равную напряжению холостого хода. Выходное напряжение не превышает напряжения потенциального барьера для данного типа полупроводника, т. е. может быть не выше 0,7 *В*. Фото*ЭДС* или *Uхх* находится по формуле:

где *Iх* – темновой ток фотодиода;

*Iф* – фототок в режиме короткого замыкания;

*ϕт* – напряжение потенциального барьера фотодиода.

Для режима холостого хода характерна логарифмическая зависимость выходного напряжения от светового потока.

Фотодиод может работать на нагрузку. Схема такого включения фотодиода показана на *рис*. 1.9. Напряжение на нагрузке определяется как разность напряжений источника питания и напряжения на фотодиоде

Фотодиоды применяются в качестве фотоприемников и датчиков различных параметров, связанных с измерением светового потока или освещенности в автоматике, телеметрии, телемеханике и радиоэлектронике. Интегральная чувствительность фотодиодов зависит от площади фотодиодов и может изменяться в пределах от 10-3*мкА*/*Лк*. до 1*мкА*/*Лк*. Темновой ток обычно составляет от 10-2 *мкА*. до 1 *мкА*. Фотодиоды имеют индивидуальную спектральную чувствительность, связанную с материалом, из которого он изготовлен (*рис.* 1.10).На нем показана зависимость *Iф = f*(*λ*)*.* Чувствительность различных фотодиодов к освещенности составляет: селеновые фотодиоды *Se* – (0,3–0,75) *мА*/*Лм*, кремниевые *Si* – 3 *мА*/*Лм,* *АgS* – (10–15) *мА*/*Лм*, германиевые *Ge* – 20 *мА*/*Лм*. Темновой ток германиевых фотодиодов – (10–30) *мкА* кремниевых фотодиодов (1–3) *мкА*.

1.9. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Светоизлучающие диоды (*СИД*) преобразуют электрическую энергию в световое излучение за счет рекомбинации электронов и дырок. В обычных диодах происходит фотонная рекомбинация электронов и дырок с малым выделением тепла. В *СИД* преобладает рекомбинация с выделением света, и длина волны лежит в узкой полосе частот. В качестве материала для светодиодов применяют фосфид галлия *GaР*, арсенид галлия *GaAs*, карбид кремния *SiC.* Максимальным световым потоком *Iф* обладает фосфид галлия.



При прямом напряжении в полупроводниковых диодах происходит инжекция основных носителей зарядов из эмиттерной области в область базы. Например, если концентрация электронов в *n-*области больше, чем концентрация дырок в *р*-области, т. е. при *nn* > *рр* происходит инжекция электронов из *n*-области в *р*-область. Инжектированные электроны рекомбинируют с основными носителями базовой области в данном случае с дырками *р*-области. Рекомбинирующие электроны переходят из более высокого энергетического уровня, близкого к уровню валентной зоны, на более низкие уровни. При этом выбрасывается квант света с энергией:



Длина волны излучения зависит от материала изготовления, как видно из графика *I = f*(*λ*)(*рис*. 1.11), где *ν* - частота кванта, *λ* - длина волны, *h*- постоянная Планка.

К основным параметрам светодиодов относятся:

1. сила света на единицу тока светодиода;
2. яркость свечения, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности;
3. постоянное прямое напряжение;
4. цвет свечения и длина волны, соответствующая максимальному световому потоку;
5. максимально допустимое обратное напряжение;
6. диапазон температур, при которых может нормально работать светодиод. Обычно диапазон рабочих температур –60 0*С* +70 0*С*.

1.10. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

По конструкции изготовления выпрямительные диоды делятся на плоскостные и точечные.

По технологии - сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

Плоскостные диоды имеют большую площадь *р-n*–перехода и применяются в вентилях для выпрямления значительных токов. Диоды, рассчитанные на выпрямление токов свыше 10 *А*, называются вентилями или силовыми диодами. Для выпрямления или детектирования незначительных токов применяют точечные диоды. В качестве материала для мощных выпрямительных диодов применяют кремний или арсенид галлия. Связано это с достаточно большой допустимой плотностью тока (для кремния порядка 80 *А*/*см*2) и незначительной температурной зависимостью тока диода. С увеличением тока выпрямительного диода растет площадь *р-n*-перехода, что приводит к росту межэлектродной емкости этого перехода. Этот фактор сказывается на работе диодов в цепях переменного тока. С повышением частоты сети диод в непроводящий полупериод можно рассматривать, как конденсатор, который может начать пропускать переменный ток в обратном направлении. Для кремниевых сплавных диодов частота в 5 *кГц* является граничной, а для кремниевых диодов, изготовленных по диффузионной технологии, эта частота достигает 100 *кГц*. Существует группа полупроводниковых диодов, в которых область *n* заменена на металлическую область и которые могут работать на частотах до 500 *кГц*. Диоды с такой областью называются диодами Шотки.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

1. *Iпр. макс* – максимально допустимый прямой ток диода;
2. *Uобр. макс*. – максимально допустимое обратное напряжение;
3. *Iобр*– обратный ток диода при заданном значении обратного напряжения;
4. *tвос*. – время восстановления обратного напряжения;
5. *fмакс*- предельная частота работа диода.

На *ВАХ* полупроводникового диода (*рис*. 1.12) отмечены *Iпр.макс* и *Uобр.макс*. Максимально допустимый ток для каждого полупроводникового диода строго индивидуален. Связано это, прежде всего с размерами его таблетки. С увеличением тока диода начинает расти плотность тока, и когда она достигает критического значения для данного конкретного материала диода, возникает тепловой пробой, который является необратимым. Полупроводниковый диод после теплового пробоя не подлежит восстановлению. Он теряет свое основное свойство – одностороннюю проводимость, и начинает проводить ток в обоих направлениях, или выгорает *р-n-* переход. В последнем случае диод не проводит ток ни в одном направлении.

При обратном включении толщина запирающего слоя полупроводникового диода увеличивается, но он ограничен размерами таблетки диода. Наступает момент, когда напряженность внешнего электрического поля становится столь значительной, что происходит пробой *р-n*-перехода по напряжению. Такой пробой не всегда заканчивается выходом диода из строя. Имеет место Зенеровский пробой, который является обратимым. При этом пробое нельзя допускать большого обратного тока диода, чтобы не возник тепловой пробой. Зенеровский пробой сопровождается значительным ростом обратного тока при постоянном напряжении на диоде. Возникает эффект стабилизации напряжения. Прибор, использующий это явление, называется стабилитроном.

На работу выпрямительных диодов значительное влияние оказывает температура. С ее ростом значительно увеличивается обратный ток диода. Так при увеличении температуры германиевых диодов на каждые 10о*С* обратный ток возрастает вдвое, а у кремниевых диодов в 2,5 раза (*рис*.1.12, пунктирная линия). Максимально допустимая температура германиевых диодов составляет + 80о*С*, а кремниевых диодов составляет + 150о*С*.

При работе полупроводникового диода неизбежны потери мощности на самом диоде. Они складываются из: 1) потерь на токе в прямом направлении; 2) потерь на токе в обратном направлении; 3) потерь на этапе обратного восстановления.

1.11. СТАБИЛИТРОН

Полупроводниковый прибор, работающий в режиме лавинного (Зенеровского) пробоя называют *стабилитроном*. Процесс пробоя был описан выше. Учитывая то, что пробой происходит при обратном напряжении, стабилитрон включается в схему обратно прямому напряжению (*рис*. 1.14, *а* и *рис*. 1.15.)

Полупроводниковый прибор, стабилизирующий малые напряжения при использовании прямой ветви *ВАХ* диода называется *стабистором*. Режим стабилитрона наблюдается при обратном включении напряжения, а режим стабистора при прямом напряжении. Получение низких стабилизированных напряжений связано с определенными трудностями, т. к. стабилитронов низкого напряжения не существует. Для получения низкого стабилизированного напряжения применяют прямую ветвь *ВАХ* диодов. Дифференциальное сопротивление диода резко падает при напряжении потенциального барьера.

При встречно-параллельном включении двух стабилитронов можно поддерживать постоянным как положительное, так и отрицательное напряжения. Такой стабилитрон называется двухоперационным. Его ВАХ приведена на *рис*.1.13, *б,* а схема включения на *рис.* 1.14*, б*.

К основным параметрам полупроводникового стабилитрона относится:

1. *Iст.мин* – минимальный ток стабилизации;
2. *Iст. макс* – максимальный ток стабилизации;
3. *Uст*  - напряжение стабилизации;
4. *Р ст  -* мощность стабилизации;

*ТКНст* – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

1.12. ОПТРОНЫ

Электронное устройство, имеющее оптическую связь излучателя и приемника называется оптроном. В состав оптрона входит встроенный светодиод и фотоприемник *ри*с. 1.18. В качестве второго применяют фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, полевые фототранзисторы, однопереходные фототранзисторы, фототиристоры и т. д. Основными достоинствами оптронов являются:

* гальваническая развязка по току источника сигнала и исполнительной части схемы;
* малая инерционность и широкий диапазон рабочих частот от постоянного тока до частот 104 *Гц*;
* высокая помехозащищенность от внешнего воздействия;
* хорошая совместимость с цифровыми интегральными схемами.

Оптроны состоят из цепей управления и цепей приемника. В цепь управления входит излучающий светодиод, а в цепь приемника включен фотоприемник.

При закрытом исполнении оптрона пространство между излучателем и фотоприемником заливается прозрачным полимером.

При открытом исполнении возможны варианты,. Первый имеет пространство между светодиодом и приемником, в котором может помещаться датчик положения. Такое устройство имеет датчик положения «мышь» в компьютере. В двух датчиках располагается диски с просечками, которые способы считывать импульсы, возникающие при перемещении «мыши» на плоскости. По ним компьютер определяет координаты точки на плоскости.

Несколько иначе выглядит датчик второго варианта, в котором фотоприемник читает информацию в отраженном свете (*рис*. 1.18, *б*). Поверхность отражателя может быть как светлой, так и темной. Во втором случае предмет, помещенный в пустое пространство, должен быть светлым для отражения сигнала светоизлучающего диода.

1.13. РЕЗИСТОРНЫЕ ОПТОПАРЫ

Излучателем является светодиод, а приемником фоторезистор на основе селенида кадмия или сульфида кадмия. При использовании инфракрасного светодиода фотоприемник выполнен на основе селенида свинца или сульфида свинца. Светодиод может быть включен как в цепь постоянного тока, так и переменного тока *рис*.1.19. Одной из основных характеристик оптопар является передаточная характеристика. Кроме светодиодов могут применяться сверхминиатюрные лампы или люминесцентные конденсаторы.

Резисторные оптопары могут быть многофункциональными. Например, оптронная сборка АОРС113А содержит две оптронные сборки с параллельно-последовательными фоторезисторами в каждой оптопаре и т.д.

1.14. ДИОДНЫЕ ОПТОПАРЫ

Прибор состоят из кремниевого фотодиода и инфракрасных кремниевых светодиодов. Фотодиод работает в фотогенераторном режиме, вырабатывая *ЭДС* до 0,8 *В*. Для повышения быстродействия применяют фотодиоды *p-i–p-*типа.

Кроме одноканальных оптопар бывают многоканальные, которые в одном корпусе содержат несколько оптопар. Оптопары АОД111А - отражательного типа. В оптопаре установлен один светодиод, и два фотодиода, облучаемых одним светодиодом. На основе оптопар создают импульсные трансформаторы, не имеющие обмоток. Одной из разновидностей оптопар является оптронный варикап.



1.15. ТРАНЗИСТОРНЫЕ ОПТОПАРЫ

В качестве излучателя применяются арсенид – галлиевые светодиоды. В качестве приемников применяют кремниевые фототранзисторы

*n–p–n*-типа (*рис*. 1.21, *а*). Оптроны таких типов, в основном, работают в режиме ключей. При подаче управляющего напряжения на светодиод происходит открывание (закрывание) транзисторов и коммутация электрических цепей с оптической развязкой.

В оптопарах могут применяться и однопереходные транзисторы (*рис*. 1.21, *б*) для формирования импульсов прямоугольной формы. Однопереходные транзисторы могут использоваться и как фоторезисторные оптроны при включении эмиттерного перехода, или как фотодиоды при включении только одного перехода.

Оптроны на полевых транзисторах (*рис*. 1.21, *в*) обладают хорошей линейностью в широком диапазоне напряжений и токов. Они хорошо согласуются с аналоговыми схемами.

При использовании составных транзисторов (*рис*. 1.22) можно получить высокие коэффициенты усиления слабых сигналов, но при этом быстродействие оптопары ниже, чем у диодных оптопар.

1.16. ТИРИСТОРНЫЕ ОПТОПАРЫ

Фотоприемник прибора - кремниевый фототиристор. Основная область использования - схемы для управления мощными тиристорами *рис*. 1.23. Основное достоинство оптронных тиристоров – оптическая развязка входного и выходного сигналов.