

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Шахноза Абдурахимовна Туляганова

Ассистент Ташкентского университета информационных технологий имени
Мухаммада аль-Хорезми

Лола Маннаповна Мухамедаминова

Старший преподаватель Ташкентского университета информационных технологий
имени Мухаммада аль-Хорезми

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7488653>

Аннотация. В данной статье приводится обзор поверхностных явлений в полупроводниках. Наглядное представление о возникновении поверхностных состояний можно получить из рассмотрения связей, действующих между атомами в объеме и на поверхности кристалла.

Ключевые слова: полупроводник, кристалл, (резка, полировка, шлифовка), решетки, микроскопические структурные дефекты.

SURFACE PHENOMENA IN SEMICONDUCTORS

Abstract. This article provides an overview of surface phenomena in semiconductors. A clear idea of the appearance of surface states can be obtained from consideration of the bonds acting between atoms in the volume and on the surface of the crystal.

Key words: semiconductor, crystal, (cutting, polishing, grinding), gratings, microscopic structural defects.

ВВЕДЕНИЕ

Проводимость в твердом теле возможна лишь тогда, когда возможен переход электрона на ближайший энергетический уровень, т.е. в проводимости могут участвовать электроны только тех зон, в которых есть свободные уровни.

Уровни всегда имеются в верхней разрешенной зоне. Поэтому верхнюю зону твердого тела, не заполненную (или не полностью заполненную) электронами при нулевой абсолютной температуре, называют зоной проводимости.

При нулевой абсолютной температуре проводимость в собственном полупроводнике отсутствует, потому что зона проводимости пуста, а валентная зона заполнена. Образование свободных носителей заряда в полупроводниках связано с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Для осуществления такого перехода электрон должен получить энергию, достаточную для преодоления запрещенной зоны. Эту энергию электрон получает от ионов кристаллической решетки, совершающих тепловые колебания. Таким образом, преодоление запрещенной зоны происходит обычно за счет тепловой энергии решетки. Концентрация носителей заряда, вызванная термическим возбуждением в состоянии теплового равновесия называется равновесной. Следовательно, при любой температуре, отличной от нуля возникают условия перехода электронов из верхней части валентной зоны в зону проводимости. В результате в зоне проводимости появляются свободные электроны, а в валентной зоне – незаполненные уровни.

ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ

Для выполнения измерений полупроводниковые образцы должны иметь определенную форму и определенное количество омических контактов. При этом поверхность образца необходимо подготовить так, чтобы она минимальным образом искажала результаты измерений. Для получения полупроводниковых образцов

определенной формы используют различные способы резки с последующей механической и химической обработкой. Применяется механическая резка стальными дисками или полотнами с наждачной суспензией, сухая резка алмазными дисками или полотнами, ультразвуковая резка, при которой режущее золото совершает ультразвуковые колебания. В качестве абразивов при механической и ультразвуковой резке используются порошки карборунда, карбида кремния, карбид бора, корунд, алмазный порошок и другие вещества с высокой твердостью.

Применяется также электролитическая резка, при которой между полупроводниковым образцом и проволочным электродом, находящимся в электролите, прикладывается напряжение и происходит электролитическое растворение полупроводника. Таким образом, постепенным передвижением проволочного электрода или полупроводника можно производить резку. В случае электроискровой резки в результате электрического разряда между полупроводником и электродом происходит электрическая эрозия, обусловленная высокими локальными температурами в месте разряда. После резки полупроводник подвергают механической шлифовке, полировке и химическому травлению. Цель механической шлифовки и полировки - довести образец до нужных размеров и формы, а также уменьшить нарушения поверхности после резки. Шлифовка проводится абразивными материалами высокой твердости. Обычно проводят несколько шлифовок с постепенным уменьшением размера зерна абразива. Механическая полировка завершает механическую обработку образца, при которой используются абразивные порошки с самыми малыми размерами зерен. В результате получают образцы с нарушенным поверхностным слоем, размеры которого по порядку величины соответствуют размерам зерна абразивного порошка, использованного при последней механической обработке. Для устранения последствий механической обработки используют химическое травление образца, основанное на химическом взаимодействии полупроводника с реактивами и последующим удалением продуктов реакции.

Химическое травление может быть жидкостным или газовым - продукты реакции выпадают в виде осадка в растворе либо удаляются в виде летучих газов. Более широкое распространение получило жидкостное травление.

Следующей операцией обработки является промывка, для которой используются органические растворители и спирт (главным образом для обезжиривания поверхности), а также вода - однократно или дважды дистиллированная либо деионизированная.

Для выполнения измерений на полупроводниковый образец наносятся омические контакты. Основное требование к омическим контактам заключается в том, что они не должны вносить заметного дополнительного сопротивления в рабочем интервале напряжений и токов. Последнее означает, что сопротивление омических контактов должно быть достаточно малым, а их вольтамперная характеристика - линейной. Омические контакты не должны инжектировать неосновных носителей зарядов и обладать хорошей теплопроводностью.

Нанесение омических контактов с малым сопротивлением может проводиться разными способами. Самыми простыми омическими контактами являются прижимные из мягких металлов, например олова, золота, и намазанные на поверхность пастой, амальгамой. Более надежными являются контакты, нанесенные испарением в вакууме,

припайкой, химическим осаждением, катодным распылением и другими методами. При выборе того или иного метода следует учитывать удельное сопротивление полу проводника, тип проводимости и другие параметры.

Методы измерения электрических сигналов

В процессе исследования свойств полупроводников исключительно большую роль играют электрические поля, которые могут прикладываться к образцам или возникать в результате тех или иных внешних воздействий.

Электрические поля, воздействующие на полупроводниковый образец, создаются с помощью батарей постоянного напряжения, выпрямителей или генераторов переменного сигнала различной частоты. При пропускании через полупроводник достаточно больших токов важно, чтобы последовательно с ним было включено ограничивающее сопротивление (рис. 1).

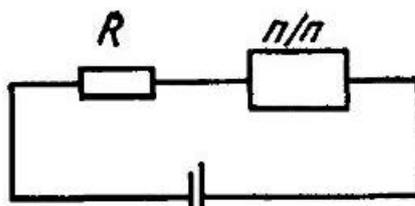


Рис. 1. Схема включения полупроводника и ограничивающего сопротивления

Величина этого сопротивления выбирается из условия, чтобы ток через образец в случае его нагрева не превышал допустимого, а образец, сопротивление которого при нагреве уменьшается, не расплавился. Измерение электрических величин проводится с помощью приборов двух типов - приборов, показывающих, предварительно проградуированных, и компарирующих, сравнивающих измеряемую величину с известной.

Для показывающих приборов существует ряд измерительных систем, которые различаются по способу преобразования электрического сигнала в механическое перемещение. Так, в магнитоэлектрических приборах перемещение подвижной части осуществляется за счет взаимодействия магнитного потока постоянного магнита и проводника (рамки), через который проходит ток. В приборах электромагнитной системы взаимодействуют магнитное поле измеряемого тока с подвижным ферромагнитным сердечником. В приборах электродинамической системы взаимодействуют два контура с токами. Электростатическая измерительная система основана на взаимодействии зарядов на электродах. В приборах тепловой электроизмерительной системы используется тепловое действие тока, вызывающее удлинение или изгиб проводника.

Приборы магнитоэлектрической системы могут измерять только постоянное напряжение и токи, а приборы остальных систем - как постоянные, так и переменные напряжения и токи. Наиболее чувствительными являются приборы магнитоэлектрической системы, а наименее чувствительными - приборы тепловой электроизмерительной системы.

Измерение напряжения и тока производится с помощью электронных вольтметров и амперметров. Например, в ламповом вольтметре напряжение усиливается электронной схемой, выпрямляется и измеряется стрелочным прибором. Такие приборы имеют большое входное сопротивление (до 10^8 Ом) и являются хорошими вольтметрами. Ламповый

электромметр позволяет измерять токи до $10^{-15} \dots 10^{-17}$ А. На входе такого прибора включена специальная электромметрическая лампа (тетрод или триод с малым сеточным током).

Особый класс представляют электронные приборы с цифровой индикацией - цифровые вольтметры и амперметры. В таких приборах измеряемая величина преобразуется в дискретный ряд значений, а результаты измерений представляются в цифровом коде, например напряжение преобразуется в частоту следования импульсов или в интервал времени.

Напряжения и токи могут измеряться также с помощью других показывающих приборов, например осциллографов и самописцев.

К компарирующим приборам, измеряющим напряжение и ток, относятся потенциометры, которые сравнивают эталонную величину или ее часть с измеряемой. Различают потенциометры постоянного и переменного токов.

Энергетический спектр электрона в твердом теле в приближении сильно связанных электронов предполагалась что везде в кристалле сохраняется строгая периодичность кристаллического потенциала, а ограниченность объема кристалла учитывалась введением циклических граничных условий Борна – Кармана. Последние приводили к дискретности энергетического спектра в пределах разрешенных зон энергий. Однако более детальное рассмотрение показывает, что влияние конечных размеров кристалла наличием границ не исчерпывается. Действительно, поверхность есть естественное нарушение периодичности потенциала и, следовательно, можно ожидать появления особенностей в спектре разрешенных состояний электрона кристалла.

Таммом было показано, что обрыв периодичности кристаллического потенциала на поверхности приводит к появлению локализованных состояний, энергетические уровни которых располагаются в запрещенной зоне. Эти состояние называют поверхностными состояниями или уровнями Тамма. Поскольку обрыв потенциала происходит в каждой цепочке атомов, нормальной к поверхности атомов, то, очевидно, плотность таммовских уровней равна плотности поверхностных атомов т.е. 10^{15} см⁻².

С такой же плотности состояний приводят поверхностные уровни теоретически предсказанные Шоковый и интерпретирующийся как насыщенные валентности поверхностных атомов кристалла.

Оба типа состояний относятся к идеализированной модели поверхности и могут рассматриваться лишь применительно к так называемой атомарно – чистой поверхности. Однако даже в случае атомарно – чистой поверхности структура поверхности существенно отличается от идеализированной модели из-за перегруппировки поверхностных атомов вызванной взаимным насыщением свободных валентных связей поверхностных атомов кристалла.

Реальная поверхность полупроводника, с которой приходится иметь дела, весьма далека от идеальной, ибо на ней практически всегда вместо различного рода макроскопические и микроскопические структурные дефекты, связанные с условиями обработки (резка, полировка, шлифовка и т.д.) и роста кристалла (огранка кристалла и другого рода особенности рельефа поверхности макроскопических и микроскопических размеров). Кроме того, реальная поверхность полупроводника находится в постоянном контакте с окружающей средой, различного рода химическими соединениями, применяемыми в качестве травителей, в результате чего на поверхности возможна

адсорбция посторонних атомов и молекул из этих источников, появление окисных пленок как результат окислительное – растворительных реакции при травлении и т.д. Все это приводит к появлению локализованных на поверхности полупроводника состояний, которые в зависимости от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные центры захвата или рекомбинационные ловушки электронных – дырочных пар.

Электро параметры полупроводниковых приборов, их стабильность во времени при изменении температуры в значительной степени определяются процессами на поверхности полупроводника и в окисле, который всегда присутствует на поверхности реальных приборов. Основная классификация поверхностных состояний следующая:

- 1. поверхностные состояния на границе раздела, которые определяются как энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника на границе раздела изолятор (окисел)- полупроводник, способные обмениваться зарядом с полупроводников в течение сравнительно короткого времени;
- 2. фиксированные поверхностные заряды, которые локализируются вблизи поверхности полупроводника (около 200 ангстрем) и не способны перемещаться под действием электрического поля;
- 3. подвижные ионы, например, ионы натрия, способные перемещаться в изоляторе под действием термообработки;
- 4. ионизируемые ловушки, которые могут возникать, например, при облучении рентгеновскими или гамма-лучами.

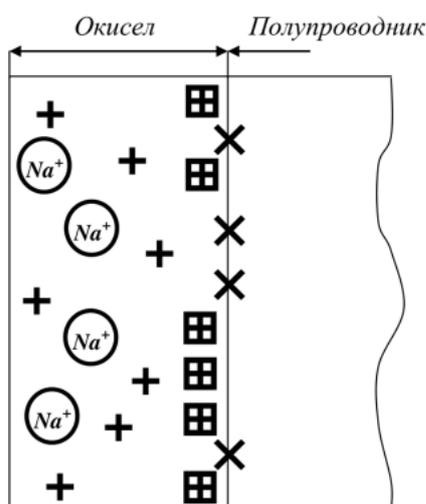


Рис. 2.

Поверхностные состояния возникают в запрещенной зоне вследствие нарушения периодичности кристаллической структуры на поверхности полупроводника. Возникающие оборванные валентные связи атомов полупроводника при определенных условиях могут вести себя подобно донорам, если они отдают несвязанный электрон, или подобно акцепторам, если они присоединяют к себе лишний электрон. Поэтому поверхность полупроводника становится обогащенной или электронами или дырками.

Энергетический спектр электрона, движущегося в строго периодическом поле неограниченного кристалла, имеет зонную структуру: полосы разрешенных энергий отделены друг от друга зонами запрещенных энергий. Нарушение периодичности потенциала, вызванное дефектами решетки (примесными атомами, вакансиями и др.), приводит к возникновению в запрещенной зоне дискретных уровней.

Подобными дефектами являются и свободные поверхности кристалла, на которых происходит обрыв решетки и нарушение периодичности ее потенциала. Влияние такого рода дефектов на энергетический спектр электронов было исследовано Таммом в 1932 г.. Он показал, что обрыв решетки приводит к появлению в запрещенной зоне полупроводника разрешенных дискретных уровней энергии для электронов, расположенных в непосредственной близости от поверхности кристалла. Такие уровни получили название поверхностных уровней или поверхностных состояний.

Возникновение поверхностных состояний:

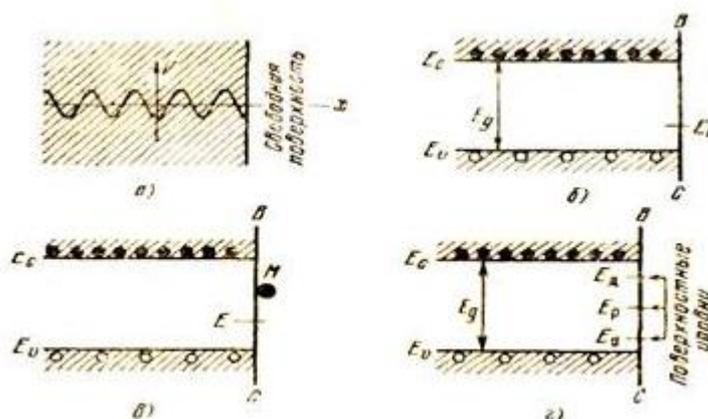


Рис. 3.

а -- обрыв периодического потенциала решетки у поверхности кристалла; б -- поверхностные состояния, возникающие вследствие обрыва решетки; в -- чужеродные атомы М на поверхности; г -- типы поверхностных состояний (E_d -- донорные, E_a -- акцепторные, E_p -- рекомбинационные)

Наглядное представление о возникновении поверхностных состояний можно получить из рассмотрения связей, действующих между атомами в объеме и на поверхности кристалла. На рис. 3 изображена плоская модель решетки германия. Атом в объеме кристалла окружен четырьмя ближайшими соседями, связь с которыми осуществляется путем попарного обобществления валентных электронов. У атомов, расположенных на свободной поверхности АА, одна валентная связь оказывается разорванной, а электронная пара неупакованной. Стремясь укомплектовать эту пару и заполнить свою внешнюю оболочку до устойчивой восьмиэлектронной конфигурации, поверхностные атомы ведут себя как типичные акцепторы, которым в запрещенной зоне соответствуют акцепторные уровни E_a (рис. 3, б). Электроны, попавшие на эти уровни из валентной зоны, не проникают в глубь кристалла и локализуются на расстоянии порядка постоянной решетки от поверхности. В валентной зоне возникают при этом дырки, а в поверхностном слое полупроводника -- дырочная проводимость.

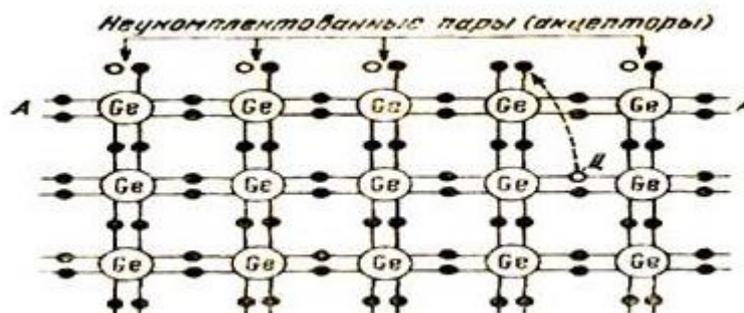


Рис.4. Схема возникновения акцепторных поверхностных состояний на чистой поверхности полупроводника

Рассмотренные поверхностные состояния возникают на идеально чистой бездефектной поверхности, получить которую практически невозможно. В реальных условиях поверхностные свойства полупроводников определяются поверхностными состояниями, созданными главным образом чужеродными атомами (молекулами) на поверхности. На рис. 3, в показана зонная структура полупроводника. Вертикальной прямой *BC* обозначена одна из свободных его поверхностей. Предположим, что на этой поверхности химически сорбировалась частица *M*. При такой сорбции волновые функции решетки и частицы перекрываются настолько, что частицу можно рассматривать как примесь, локально нарушающую периодичность потенциала решетки и приводящую к возникновению в запрещенной зоне поверхностного уровня.

Характер таких уровней зависит от природы поверхности и частиц. Они могут быть акцепторными, донорными и рекомбинационными). Так, кислород, сорбированный на поверхности германия, создает акцепторные уровни, вода -- донорные. Если уровни *P* являются акцепторными, то они захватывают электроны и заряжают поверхность полупроводника отрицательно с поверхностной плотностью $y^- = gNf_{\text{ф-д}}$, где *N* -- число молекул, адсорбированных единицей поверхности кристалла; $f_{\text{ф-д}}$ -- функция Ферми -- Дирака, выражающая вероятность заполнения поверхностных уровней электронами; *q* -- заряд электрона. Если уровни *P* являются донорными, то они, отдавая электроны кристаллу, заряжают поверхность полупроводника положительно с плотностью $y^+ = qNf_{\text{ф-д}}$; где $f_{\text{ф-д}}$ -- вероятность того, что поверхностные уровни являются пустыми, т. е. частицы *M* ионизированы.

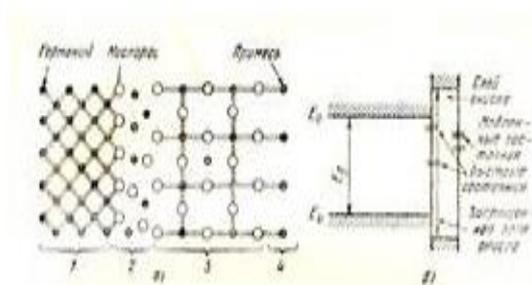
При высокой плотности поверхностных состояний они, взаимодействуя друг с другом, могут размыться в поверхностную зону. Электроны в этой зоне могут двигаться только вдоль поверхности.

Быстрые и медленные поверхностные состояния. Поверхностные состояния, обусловленные дефектами поверхности и адсорбцией на ней чужеродных частиц, располагаются в непосредственной близости от поверхности и находятся в хорошем контакте с объемной полупроводника. Поэтому время установления равновесия этим состояний с объемом полупроводника (время перехода электронов из энергетических зон на поверхностные уровни или обратно) оказывается очень небольшим (10^{-7} с). Такие состояния называют быстрыми поверхностными состояниями. Они имеют плотность порядка 10^{15} м^{-2} , зависящую от характера обработки поверхности, и могут обладать

большими сечениями захвата как для электронов, так и для дырок, вследствие чего могут служить эффективными центрами рекомбинации.

В нормальных условиях поверхность полупроводника покрыта слоем окисла толщиной по крайней мере в десятки ангстрем. На внешней поверхности окисла сорбируются примесные атомы, создающие внешние или медленные поверхностные состояния. Время установления равновесия таких состояний с объемом полупроводника значительно больше, чем для быстрых состояний, и колеблется от микросекунд до минут, часов и даже суток. Это обусловлено тем, что вероятность прохождения электронов сквозь окисный слой, являющийся изолятором, весьма низка. С увеличением толщины окисной пленки постоянная времени увеличивается.

Медленные поверхностные состояния могут создаваться также атомами примеси, находящимися в самом окисле. Плотность медленных состояний значительно больше, чем быстрых (10^{17} -- 10^{19} м^{-2}), и сильно зависит от их природы и состояния внешней среды.



Структура поверхностного слоя германия (а) и расположение быстрых и медленных поверхностных состояний (изгиб зон у поверхности не показан) (б): 1 - германий; 2 - переходный слой; 3 - окисный слой; 4 - адсорбированные примеси.

REFERENCES

1. Артемьев Б.Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. - М.: Изд-во стандартов, 1982.- 279 с.
2. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. - М.: Радио и связь, 1985.- 264 с.
3. Бонч - Бруевич В.Л., Звягин И.П., Кайпер Р. Электронная теория неупорядоченных полупроводников - М.: Наука, 1981. - 384 с.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1977.- 674 с.
5. Аджемов С.С., Урядников Ю.Ф. Технологии широкополосного доступа: динамика и перспективы развития // Электросвязь. -2011.- №1. -с. 19-23.
6. Хорев А.А. Средства перехвата информации с проводных линий связи // Защита информации. INSIDE -2011 // -№1. с. 22-32. Системы оптического доступа следующего поколения. По материалам журнала New Breeze // Век качества. -2017. -№8. -с. 45-47.
7. Никульский И.Е. Модель оптической сети доступа GPON // Вестник связи. -2011. - № 2. -с. 49-50.

9. Абрамова У.С., Павлова., М.С.Кортунин Последние достижения подводной оптической связи // Вестник связи. - 2021. -№12. - с. 13-20.
10. <http://ntc.metrotek.ru/b45otdr.html> - страница измерительного прибора, для которого разрабатывался модуль рефлектометра
11. WWW. tehcom.com.