Реферат

"Электронно-дырочные гетеропереходы и их отличия от гомопереходов"

**Гетеропереход**

Контакт двух различных по химическому составу полупроводников. На границе раздела ПП обычно изменяются ширина запрещённой зоны, подвижность носителей заряда, их эффективные массы и др. характеристики. В «резком» Г. изменение св-в происходит на расстоянии, сравнимом или меньшем, чем ширина области объёмного заряда (см. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД). В зависимости от легирования обеих сторон Г. можно создать р – n-Г. (анизотипные) и n-Г. или р – р-Г. (изотипные). Комбинации разл. Г. и монопереходов образуют гетероструктуры.

Образование Г., требующее стыковки крист. решёток, возможно лишь при совпадении типа, ориентации и периода крист. решёток сращиваемых материалов. Кроме того, в идеальном Г. граница раздела должна быть свободна от структурных и др. дефектов (дислокаций, точечных дефектов и т.п.), а также от механич. напряжений. Наиболее широко применяются монокристаллич. Г. между полупроводниковыми материалами типа AIIIBV и их твёрдыми растворами на основе арсенидов, фосфидов и антимонидов Ga и Al. Благодаря близости ковалентных радиусов Ga и Al изменение хим. состава происходит без изменения периода решётки. Гетероструктуры получают также на основе многокомпонентных (четверных и более) тв. растворов, в к-рых при изменении состава в широких пределах период решётки не изменяется. Изготовление монокрист. Г. и гетероструктур стало возможным благодаря развитию методов эпитаксиального наращивания ПП кристаллов (см. ЭПИТАКСИЯ).

Г. используются в разл. ПП приборах: ПП лазерах, светоизлучающих диодах, фотоэлементах, оптронах и т.д.

**Гомопереход**

В отличие от гетероперехода – контакт двух областей с разными типами проводимости или концентрациями легирующей примеси в одном и том же кристалле полупроводника. Различают p – n-переходы, в к-рых одна из двух контактирующих областей легирована донорами, а другая – акцепторами (см. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД), n+–n-переходы (обе области легированы донорной примесью, но в разл. степени) и p+–p-переходы (обе области легированы акцепторной примесью).

**Гетеропереход. Основные свойства и характеристики**

Разработками данной проблемы занимался выдающийся советский ученый Ж.И. Алферов. В 1961 г. он защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую в основном разработке и исследованию мощных германиевых и частично кремниевых выпрямителей. Заметим, что в этих приборах, как и во всех ранее созданных полупроводниковых приборах, использовались уникальные физические свойства p–n-перехода – искусственно созданного в полупроводниковом монокристалле распределения примесей, при котором в одной части кристалла носителями заряда являются отрицательно заряженные электроны, а в другой – положительно заряженные квазичастицы, «дырки» (латинские n и p как раз и значат negative и positive). Поскольку различается лишь тип проводимости, а вещество одно и то же, p–n-переход можно назвать гомопереходом.

Благодаря p–n-переходу в кристаллах удалось осуществить инжекцию электронов и дырок, а простая комбинация двух p–n-переходов позволила реализовать монокристаллические усилители с хорошими параметрами – транзисторы. Наибольшее распространение получили структуры с одним p–n-переходом (диоды и фотоэлементы), двумя p–n-переходами (транзисторы) и тремя p–n-переходами (тиристоры). Всё дальнейшее развитие полупроводниковой электроники шло по пути исследования монокристаллических структур на основе германия, кремния, полупроводниковых соединений типа АIIIBV (элементов III и V групп Периодической системы Менделеева). Улучшение свойств приборов шло главным образом по пути совершенствования методов формирования p–n-переходов и использования новых материалов. Замена германия кремнием позволила поднять рабочую температуру приборов и создать высоковольтные диоды и тиристоры. Успехи в технологии получения арсенида галлия и других оптических полупроводников привели к созданию полупроводниковых лазеров, высокоэффективных источников света и фотоэлементов. Комбинации диодов и транзисторов на одной монокристаллической кремниевой подложке стали основой интегральных схем, на которых базировалось развитие электронно-вычислительной техники. Миниатюрные, а затем и микроэлектронные приборы, создаваемые в основном на кристаллическом кремнии, буквально смели электровакуумные лампы, позволив уменьшить в сотни и тысячи раз размеры устройств. Достаточно вспомнить старые ЭВМ, занимавшие огромные помещения, и их современный эквивалент ноутбук – компьютер, напоминающий маленький атташе-кейс, или «дипломат», как его называют в России.

Один из выводов кандидатской диссертации гласил, что p–n-переход в гомогенном по составу полупроводнике (гомоструктура) не может обеспечить оптимальные параметры многих приборов. Стало ясно, что дальнейший прогресс связан с созданием p–n-перехода на границе разных по химическому составу полупроводников (гетероструктурах).

Лазеры на гомопереходах были неэффективны из-за высоких оптических и электрических потерь. Пороговые токи были очень высоки, а генерация осуществлялась только при низких температурах.

Вскоре были сформулированы общие принципы управления электронными и световыми потоками в гетероструктурах.

Первоначально теория развивалась существенно быстрее, чем практическая реализация устройств.

В то время существовал всеобщий скептицизм по поводу создания «идеального» гетероперехода, тем более с теоретически предсказываемыми инжекционными свойствами.

Итак, реализация гетероперехода открывала возможность создания более эффективных приборов для электроники и уменьшения размеров устройств буквально до атомных масштабов.

Максимальный эффект ожидался при использовании гетеропереходов между полупроводником, служащим активной областью прибора, и более широкозонным полупроводником. В качестве наиболее перспективных в то время рассматривались системы GaP–GaAs и AlAs–GaAs. Для «совместимости» эти материалы в первую очередь должны были удовлетворять самому важному условию: иметь близкие значения постоянной кристаллической решётки.

Дело в том, что многочисленные попытки реализовать гетеропереход были безуспешными: ведь не только размеры элементарных ячеек кристаллических решёток полупроводников, составляющих переход, должны практически совпадать, но и их тепловые, электрические, кристаллохимические свойства должны быть близкими, как и их кристаллические и зонные структуры.

Такую гетеропару найти не удавалось. И вот за это, казалось бы, безнадёжное дело взялся Ж.И. Алфёров. Нужный гетеропереход, как оказалось, можно было формировать путём эпитаксиального выращивания, когда один монокристалл (вернее, его монокристаллическая плёнка) наращивался на поверхности другого монористалла буквально послойно – один монокристаллический слой за другим. К нашему времени разработано много методов такого выращивания. Это и есть те самые высокие технологии, которые обеспечивают не только процветание электронных фирм, но и безбедное существование целых стран.

Первоначально была предпринята попытка создать двойную гетероструктуру GaP0,15As0,85–GaAs. И она была выращена методом газофазной эпитаксии, а на ней был сформирован лазер. Однако из-за небольшого несоответствия постоянных решётки он, как и лазеры на гомопереходах, мог работать только при температуре жидкого азота. Ж.И. Алфёрову стало ясно, что таким путём реализовать потенциальные преимущества двойных гетероструктур не удастся.

Было обнаружено что неустойчивый сам по себе арсенид алюминия абсолютно устойчив в тройном соединении AlGaAs, так называемом твёрдом растворе. Свидетельством этому были давно выращенные путём охлаждения из расплава кристаллы этого твёрдого раствора, хранившиеся у одного из ученых в столе уже несколько лет. Примерно так в 1967 г. была найдена ставшая теперь классической в мире микроэлектроники гетеропара GaAs–AlGaAs.

Изучение фазовых диаграмм, кинетики роста в этой системе, а также создание модифицированного метода жидкофазной эпитаксии, пригодного для выращивания гетероструктур, вскоре привели к созданию гетероструктуры, согласованной по параметру кристаллической решётки.

С этого момента реализация главных преимуществ гетероструктур пошла стремительно. Прежде всего экспериментально были подтверждены уникальные инжекционные свойства широкозонных эмиттеров и эффект суперинжекции, продемонстрировано стимулированное излучение в двойных гетероструктурах, установлена зонная структура гетероперехода AlxGa1–xAs, тщательно изучены люминесцентные свойства и диффузия носителей в плавном гетеропереходе, а также чрезвычайно интересные особенности протекания тока через гетеропереход, например, диагональные туннельно-рекомбинационные переходы непосредственно между дырками из узкозонной и электронами из широкозонной составляющих гетероперехода.

**Основные преимущества гетероструктур были реализованы**

– в низкопороговых лазерах на двойных гетероструктурах, работающих при комнатной температуре;

– в высокоэффективных светодиодах на одинарной и двойной гетероструктурах;

– в солнечных элементах на гетероструктурах;

– в биполярных транзисторах на гетероструктурах;

– в тиристорных p–n–p–n гетероструктурах.

Если возможность управления типом проводимости полупроводника с помощью легирования различными примесями и идея инжекции неравновесных носителей заряда были теми семенами, из которых выросла полупроводниковая электроника, то гетероструктуры давали возможность решить значительно более общую проблему управления фундаментальными параметрами полупроводниковых кристаллов и приборов, такими, как ширина запрещённой зоны, эффективные массы носителей заряда и их подвижности, показатель преломления, электронный энергетический спектр и т.д.

Идея полупроводниковых лазеров на p–n-переходе, экспериментальное наблюдение эффективной излучательной рекомбинации в p–n-структуре на основе GaAs с возможностью стимулированного излучения и создание лазеров и светоизлучающих диодов на p–n-переходах были теми зёрнами, из которых начала расти полупроводниковая оптоэлектроника.

Одним из первых опытов успешного применения гетероструктур в нашей стране стало использование солнечных батарей в космических исследованиях. Солнечные батареи на основе гетероструктур были созданы Ж.И. Алфёровым и сотрудниками ещё в 1970 г. Технология была передана в НПО «Квант», и солнечные элементы на основе GaAlAs устанавливались на многих отечественных спутниках. Когда американцы опубликовали свои первые работы, советские солнечные батареи уже летали на спутниках. Было развёрнуто их промышленное производство, а их 15-летняя эксплуатация на станции «Мир» блестяще доказала преимущества этих структур в космосе. И хотя прогноз резкого снижения стоимости одного ватта электрической мощности на основе полупроводниковых солнечных батарей пока не оправдался, в космосе самым эффективным источником энергии доныне безусловно являются солнечные батареи на гетероструктуpax соединений AIIIBV.

**Оптоэлектроника**

Оптоэлектроника – это раздел электроники, связанный главным образом с изучением эффектов взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества (преимущественно твердых тел) и охватывающий проблемы создания оптоэлектронных приборов (в основном методами микроэлектронной технологии), в которых эти эффекты используются для генерации, передачи, хранения и отображения информации.

Техническую основу оптоэлектроники определяют конструктивно – технологические концепции современной электроники: миниатюризация элементов; предпочтительное развитие твердотельных плоскостных конструкций; интеграция элементов и функций; ориентация на специальные сверхчистые материалы; применение методов групповой обработки изделий, таких как эпитаксия, фотолитография, нанесение тонких пленок, диффузия, ионная имплантация, плазмохимия и др.  
Исключительно важны и перспективны для оптоэлектроники гетероструктуры, в которых контактируют (внутри единого монокристалла) полупроводники с различными значениями ширины запрещеной зоны.

**Инжекционный лазер**

Инжекционнный лазер представляет собой полупроводниковый двухэлектродный прибор с p-n-переходом (поэтому часто как равноправный используется термин «лазерный диод»), в котором генерация когерентного излучения связана с инжекцией носителей заряда при протекании прямого тока через p-n-переход.

Разновидности инжекционных лазеров. Рассмотренные теоретические положения предопределяют пути совершенствования простейшей структуры лазера. Обследованы и реализованы варианты расположения слоев по толщине кристалла. В гомогенном полупроводнике p-n-переход как средство электронного ограничения весьма несовершенен: при высоких уровнях накачки происходит бесполезная инжекция электронов влево (из-за падения коэффициента инжекции), ограничение справа достигается лишь естественным убыванием концентрации введенных дырок

Все эти несовершенства, проявляющиеся в конечном счете в высоком значении плотности порогового тока, предопределили бесперспективность лазеров на однородных полупроводниках.

Широкое промышленное распространение получили только гетеролазеры, общими особенностями которых являются односторонняя инжекция, четко выраженный волноводный эффект, возможность суперинжекции.

Поистине классической стала двойная (двусторонняя) гетероструктура (ДГС), в которой сверхтонкая активная область «зажата» между двумя гетерограницами (рис. 4, б): именно она позволяет получать малые пороговые плотности тока и значительные выходные мощности. Четырех и пятислойная структуры, являющиеся усовершенствованной ДГС

**Особенности инжекционных лазеров.**

Инжекционные лазеры имеют ряд достоинств, выделяющих их среди излучателей и предопределяющих доминирующую роль в оптоэлектронике.

1. Микроминиатюрность: теоретическая минимальная длина резонатора близка к 10 мкм, а площадь его поперечного сечения – к 1 мкм2 (объем активной области может достигать 10–12см3). Это возможно потому, что в полупроводниковых лазерах индуцированные переходы связаны не с отдельными дискретными уровнями, а с переходами зона – зона, поэтому и усиление в них наибольшее (gd103… 104 см-1).
2. Высокий КПД преобразования энергии накачки в излучение, приближающийся у лучших образцов к теоретическому пределу. Это обусловлено тем, что лишь при инжекционной накачке удается исключить нежелательные потери – вся энергия электрического тока переходит в энергию возбужденных электронов.
3. Удобство управления: низкие напряжения и токи возбуждения, совместимые с интегральными микросхемами; возможность изменения мощности излучения без применения внешних модуляторов; работа как в непрерывном, так и в импульсном режимах с обеспечением при этом очень высокой скорости переключения (в пикосекундном диапазоне).
4. Возможность генерации требуемой спектральной линии, обеспечиваемая выбором или синтезом прямозонного полупроводника с  
   необходимой шириной запрещенной зоны; возможность одномодового режима.
5. Использование твердотельной микроэлектронной групповой технологии. Отсюда высокая воспроизводимость параметров, пригодность для массового производства, низкая стоимость, долговечность.
6. Совместимость с основным элементом микроэлектроники – транзистором (по типу используемых материалов и по технологии обработки). Это открывает принципиальную возможность создания интегрированных лазерных излучателей.

Инжекционным лазерам присущи и определенные недостатки, к принципиальным можно отнести следующие:

* невысокая когерентность излучения (в сравнении, например, с газовыми лазерами)
* значительная ширина спектральной линии, большая угловая расходимость, эллиптический астигматизм;
* относительно малая генерируемая мощность (некоторые оптоэлектронные устройства, например голографические ЗУ, требуют лазеры большой мощности);
* существенность таких негативных явлений, как временная деградация (в особенности для коротковолновых лазеров), резкое уменьшение мощности излучения при повышении температуры и воздействии радиации.

**Светодиоды**

Светодиод представляет собой полупроводниковый диод с p-n – переходом, протекание тока через который вызывает интенсивное некогерентное излучение. Работа светодиода основана на спонтанной рекомбинационной люминесценции избыточных носителей заряда, инжектируемых в активную область (базу) светодиода.

Как и в случае лазеров наилучшим сочетанием параметров обладают гетеросветодиоды на основе гетероструктур, хотя специфика генерации некогерентного излучения позволяет широко использовать и светодиоды на основе однородных полупроводников.

**Искусственные квантовые ящики**

Искусственные квантовые ящики и сверхрешетки находят все большее применение при разработке излучателей. По мере уменьшения толщин активных зон лазеров и светодиодов становятся существенными квантовые размерные эффекты, т.е. явления, в которых малые геометрические размеры рассматриваемых областей обязывают учитывать квантовую природу свободных носителей заряда.

Если толщину активной области двойной гетероструктуры уменьшить до WdlБ (длина волны де Бройля), то свободные электроны в этой области начнут вести себя подобно двухмерному газу. Это значит, что в любой конкретный момент времени могут быть указаны лишь две координаты электрона (y и z на рис. 6, б), тогда как по координате x он «размазан» по всей толщине W. Такая сверхтонкая ДГС представляет собой квантовую яму (или квантовый ящик), удерживающую двухмерный электронный газ. Последовательное чередование большого числа таких ям образует сверхрешетку (рис. 6, в). В общем случае отдельные ямы в сверхрешетке не обязательно должны быть одинаковыми по глубине и ширине

Квантовые ящики и сверхрешетки изготавливают путем последовательного эпитаксиального выращивания сверхтонких (около 10 нм) слоев полупроводниковых соединений разного состава.

Размерное квантование порождает два основных физических эффекта:

* изменение зонной диаграммы, проявляющееся в появлении новых разрешенных энергетических состояний для электронов; тем самым принципиально может быть сформирована зонная структура любого вида;
* изменение кинетики электронов, проявляющееся в их пробеге между гетерограницами без соударений (и без потерь энергии) с примесными атомами, – таково свойство волны Де Бройля, распространяющейся в среде с периодически изменяющимся потенциалом; подвижность электронов оказывается такой же, как в чистом полупроводнике.

Технологическая особенность сверхрешеток состоит в том, что вследствие малости толщин соседних слоев становится существенным выравнивающее действие механических напряжений: практически сверхрешетка, несмотря на различие состава слоев, имеет одно общее усредненное значение кристаллографической постоянной. Можно предположить, что для излучателей это обстоятельство окажется более важным, чем физические факторы.

Из физических и технологических особенностей сверхрешеток вытекает ряд важных для создания излучателей следствий, часть которых уже получила экспериментальное подтверждение: это получение более высоких, чем ранее, коэффициентов усиления волны в активной среде и, как следствие, уменьшение длины резонатора лазера или снижение порогового тока; достижение высокой подвижности в сильно легированном материале и на этой основе повышение быстродействия как самих излучателей, так и схем электронного обрамления; возможность «перевода» непрямозонных полупроводников в прямозонные, получение прямозонных структур с любой шириной запрещенной зоны, а также лазеров (и светодиодов) с перестраиваемой длиной волны, продвижение в сине-зеленую и УФ-область спектра; совмещение материалов с сильным структурным рассогласованием; неизбежность открытия новых полезных явлений при дальнейшем исследовании сверхрешеток.

Таким образом, развитие физики и становление техники приборов с искусственными квантовыми ямами и сверхрешетками приведет к качественному скачку в области излучателей и в оптоэлектронике в целом.

***Приемники***  
**Фотодиод**  
Фотодиод – это фотоприемник, представляющий собой полупроводниковый диод, сконструированный и оптимизированный так, что его активная структура оказывается способной эффективно воспринимать оптичское излучение. Практически для этого корпус фотодиода имеет специальное прозрачное окно, за которым располагается фоточувствительная площадка полупроводникового кристалла. Принимаются также меры по устранению с этой площадки затеняющих элементов (непрозрачных металлических электродов), сводятся до минимума толщины вспомогательных слоев полупроводника, ослабляющих фотоэффект, на фоточувствительную поверхность наносятся специальные антиотражающие покрытия и т.п.

Гетерофотодиоды представляют собой одну из наиболее бурно развивающихся разновидностей оптоэлектронных фотоприемников. В конструкции любого гетерофотодиода выделяются прежде всего две области: «широкозонное окно» и активный фоточувствительный слой. Широкозонное окно без потерь пропускает излучение к активной области и в то же время является контактным слоем с малым последовательным сопротивлением. Процессы в активной области – поглощение излучения, накопление (собирание) генерируемых носителей заряда – в значительной степени протекают так же, как и в кремниевой p-i-n-структуре. Важное отличие заключается в том, что выбором подходящего полупроводникового соединения фоточувствительного слоя удается обеспечить полное поглощение излучения (в том числе и в ИК-области) при толщине этого слоя порядка 1 мкм. Отсюда сочетание высокого быстродействия и высокой фоточувствительности при малых питающих напряжениях.

Важнейшим достоинством гетерофотодиодов является их физическая и технологическая совместимость с устройствами интегральной оптики. Несомненно полезным может оказаться то, что они могут быть изготовлены на одном кристалле с излучателем и микросхемой, т.е. открывается возможность создания универсальных монолитных оптоэлектронных элементов дуплексной связи. Гетерофотодиоды значительно сложнее в изготовлении, чем кремниевые, однако имеющиеся технологические трудности постепенно преодолеваются. Основные материалы гетерофотодиодов – GaAlAs для l~0,85 мкм и InGaAsP, InGaAs для l=1,3… 1,55 мкм. Гетерофотодиоды работают и в режиме лавинного умножения, причем благодаря малой толщине активной области рабочее напряжение может составлять десятки вольт. Препятствием на пути их развития является то обстоятельство, что практически для всех соединений А3В5 коэффициенты размножения электронов и дырок приблизительно одинаковы (a-da+) это ведет к повышенному уровню шумов. Исключение составляет GaSb, однако этот материал пока все еще характеризуется очень низким качеством. Поэтому широкое развитие лавинных гетерофотодиодов маловероятно, их альтернативой являются интегрированные структуры, в которых на одном кристалле полупроводника A3B5 объединены гетерофотодиод и МДП – транзистор.

**Фототранзисторы**

Фототранзисторы составляют весьма представительный отряд оптоэлектронных фотоприемников, наиболее характерными чертами которого являются наличие механизмов встроенного усиления (отсюда высокая фоточувствительность) и схемотехническая гибкость, обусловленная наличием третьего – управляющего – электрода. В то же время фототранзисторам присуща заметная инерционность, что ограничивает область их примернения в основном устройствами автоматики и управления силовыми цепями. Они изготавливаются практически только на кремнии.

**Заключение**

Итак, как вы уже успели убедиться, применение гетеропереходов в оптоэлектронике помогает разрешить многие проблемы. Так, в частности, найдено решение задачи создания приборов с прямозонной энергетической диаграммой, что не удавалось реализовать на гомогенных структурах. Прозрачность широкозонного эмиттера для рекомбинационного излучения базы гетерогенной структуры существенно облегчает задачу констуирования излучательных приборов. Также гетероструктуры способствуют всё большей интеграции оптоэлектронных устройств. Реализация сверхрешеток позволит создавать элементную базу с произвольными зонными диаграммами, т.е. гетероструктуры являются перспективным направлением исследования. Технологические трудности изготовления гетеропереходов, как нам кажется, явление временное и в недалеком будущем преодолимое. Применительно к нашей специальности (физика и техника оптической связи) гетероструктуры являются хорошим подспорьем в конструировании систем волоконно-оптической связи. Инжекционные лазеры, например, с их способностью генерировать пучок света, (являющийся переносчиком информации в волоконно-оптических линиях связи) с наперед заданным направлением распространения – решение проблемы миниатюризации основных элементов систем волоконно-оптической связи.

Конечно, существуют еще много неразрешенных проблем, но, как нам кажется, будущее оптоэлектроники неразрывно связано с гетероструктурами.

Список использованной литературы

1. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983.
2. Смит Р. Полупроводники. М. Мир, 1982.
3. Алферов Ж.И. // Физика сегодня и завтра. Ред. Тучкевич В.М.Л., 1973.