

№ 1362

МИСиС

А.Н. Ковалев

Гетероструктурная наноэлектроника

Учебное пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1362

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра технологии материалов электроники

А.Н. Ковалев

Гетероструктурная наноэлектроника

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским советом
университета

УДК 621.315.529, 621.793
К56

Рецензент
д-р физ.-мат. наук, проф. *Ф.И. Маняхин*

Ковалев А.Н.

К56 Гетероструктурная наноэлектроника: Учеб. пособие. – М.:
Изд. Дом МИСиС, 2009. – 155 с.

Пособие посвящено анализу нового направления электроники – гетероструктурной наноэлектронике. Это часть более масштабного направления, называемого нанотехнологией и охватывающего разработку полупроводниковых приборов и устройств субмикронных размеров. Даны примеры реализации полевых и биполярных транзисторов на основе гетеросистем из материалов Ge/Si и $A^{III}B^V$ с субмикронными размерами активных областей. Рассмотрены механизмы формирования и условия получения гетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками в системах Ge/Si и InAs/GaAs с учетом элементов самоорганизации при эпитаксии. Интерес к самоупорядоченным наноструктурам обусловлен созданием фотоприемников и источников излучения в диапазоне длин волн 1,3...1,5 мкм.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Микроэлектроника и твердотельная микроэлектроника» и направлению «Электроника и микроэлектроника».

© Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (МИСиС), 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Новое направление полупроводниковой электроники – гетероструктурная наноэлектроника	5
2. Биполярные гетеротранзисторы на основе Si/Ge _x Si _{1-x} и A ^{III} B ^V	11
2.1. Биполярный транзистор. Общая характеристика	12
2.2. Энергетическая диаграмма идеального гетероперехода	16
2.3. Принцип действия биполярного гетеротранзистора	20
2.4. Биполярные гетеротранзисторы на Si/Ge _x Si _{1-x}	24
2.5. Углеродное ограничение профиля бора в базе SiGe-БГТ	30
2.6. Биполярные гетеротранзисторы на A ^{III} B ^V	42
2.7. Биполярные гетеротранзисторы на основе нитридов III группы	49
2.8. Сравнение достигнутых результатов с теоретическими оценками	56
3. Полевые гетеротранзисторы на A ^{III} B ^V	67
3.1. Псевдоморфные AlGaAs/InGaAs PHEMT на GaAs	70
3.2. InP HEMT и метаморфные GaAs MHEMT	78
3.3. HEMT с каналами из InAs и InSb	90
3.4. Полевые гетеротранзисторы на материалах A ^{III} N	91
4. Квантоворазмерные структуры и их применение	104
4.1. Квантовые точки Ge/Si	104
4.2. Квантовые точки в системе InAs/GaAs	115
5. Механизмы формирования гетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками	119
5.1. Самоорганизация при эпитаксии	120
5.2. Теоретические представления о достижении равновесного состояния в системе гетеронаноостровков	127
6. Приборы на основе использования массивов квантовых точек ...	134
6.1. Фотоприемники на основе квантово-размерных структур ...	137
6.2. Лазерные структуры на квантовых точках	145
6.3. Полупроводниковые нанотрубки	150
Заключение	152
Библиографический список	154

ВВЕДЕНИЕ

Многokратное увеличение уровня интеграции, быстродействия, расширения функциональных возможностей в электронике, оптике, информатике и других областях науки и техники возможно на основе нанотехнологии. Нанотехнология способна изменить все аспекты человеческого существования. Возможность синтезировать наномасштабные элементы, а затем собирать такие элементы в более крупные структуры, обладающие уникальными свойствами и функциями, приведет к революционным изменениям во многих отраслях. Изменение характеристик и появление новых свойств нанообъектов обусловлены не только уменьшением размеров элементов, но и проявлением квантомеханических эффектов, волновой природой процессов переноса и доминирующей ролью поверхностей раздела.

Полупроводниковая гетероструктурная наноэлектроника представляет собой составную часть нанотехнологии и охватывает она прежде всего разработку полупроводниковых приборов и устройств в субмикронном диапазоне размеров, приближающемся к нанометровому диапазону, т.е. к объектам меньше 100 нм.

Рассмотрены области применения и перспективы данного направления электроники. Приведены примеры реализации биполярных и полевых транзисторов на основе гетеросистем из материалов $A^{III}B^V$, размеры активных областей которых менее 100 нм.

Значительная часть работы посвящена рассмотрению механизмов формирования и условиям получения гетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками в системах Ge/Si и InAs/GaAs. Рассмотрены элементы самоорганизации при эпитаксии и применение явлений самоорганизации для эпитаксиального наращивания наногетероструктурных объектов полупроводниковой электроники на основе массива квантовых точек.

1. НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ – ГЕТЕРОСТРУКТУРНАЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Вторая половина прошедшего столетия ознаменована грандиозными достижениями в развитии полупроводниковой электроники, и, прежде всего микро- и оптоэлектроники. Эти достижения обеспечили невиданный прогресс в вычислительной технике, информатике, радиоэлектронике, энергетике и в других передовых областях науки и техники. Совершенно очевидно, что все эти преобразования были бы вряд ли возможны без выдающихся достижений в развитии материаловедения и технологии полупроводниковых материалов.

В XXI век микроэлектроника вошла с производством УСБИС динамической памяти на 1 Гбит и микропроцессоров с тактовыми частотами до 1,2 ГГц. К 2010–2012 гг. предполагается довести эти показатели до 64 Гбит и 10 ГГц соответственно. Если сегодня размер единичного транзистора в УСБИС составляет 0,18...0,13 мкм, к 2012 г. предполагается довести эту величину до 0,03...0,035 мкм. Аналогичная тенденция резкого повышения степени микроминиатюризации наблюдается и в оптоэлектронике. Уже сегодня размеры активных областей инжекционных лазеров на квантовых ямах вышли на нанометровый уровень, а впереди активное освоение производства лазеров на основе квантовых точек. Освоение размерного диапазона 1,0...0,1 мкм представляет собой весьма сложную технологическую задачу, но происходит оно с использованием традиционной элементной базы. Совершенно другая ситуация складывается при освоении диапазона линейных размеров менее 0,1 мкм. Здесь возникает фундаментальный физический барьер, обусловленный резкими изменениями практически всех свойств твердого тела, в том числе и электропроводности. При достижении таких размеров в соответствующих объектах начинают в полной мере проявляться квантовые эффекты, что требует совершенно иного подхода к конструированию приборов, которые должны работать на новых физических принципах. Вот почему освоение нанометрового диапазона размеров в современной твердотельной электронике выделено в специальное направление, названное нанoeлектроникой.

Нанoeлектроника является областью науки и техники, сформировавшейся на основе достижений физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии и технологии полупроводниковой

микроэлектроники. Разрабатываемые для наноэлектроники технологии должны быть ориентированы на массовое производство приборов и интегральных схем с минимальными размерами элементов в диапазоне от 100 нм до 1 нм.

В наноэлектронике используются следующие основные квантовые эффекты, лежащие в основе функционирования наноразмерных элементов: интерференция; квантовое ограничение; туннелирование через потенциальные барьеры.

Свободному электрону в твердом теле соответствует электромагнитная волна, способная распространяться в любом направлении. Однако поведение электрона изменяется, если он находится в области твердого тела, ограниченной потенциальными барьерами, примером которой может являться квантовый шнур с ограниченными размерами структуры. При этом соответствующие им электроны могут иметь только определенные фиксированные значения энергии, тогда как вдоль шнура могут двигаться электроны с любой энергией. Запирание электрона хотя бы в одном из направлений сопровождается увеличением его импульса. Данное явление называется квантовым ограничением и приводит, с одной стороны, к увеличению минимальной энергии электрона, а с другой – к дополнительному квантованию энергетических уровней, вследствие чего свойства наноразмерных структур будут отличаться от свойств материала, из которого они сформированы.

На туннелирование электронов в наноразмерных структурах существенное влияние оказывает квантовое ограничение. Квантование их энергетических состояний в тонких периодически расположенных ямах вызывает появление у туннелирования резонансного характера.

Интенсивное исследование квантовых эффектов в сверхтонких полупроводниковых гетероструктурах привело к появлению новых классов полупроводниковых приборов – резонансных туннельных диодов и транзисторов, обладающих потенциально очень высоким быстродействием (предельные частоты до 10^{12} Гц) и широким спектром других возможностей, а также инжекционных лазеров на квантовых ямах и квантовых точках с уникальными рабочими характеристиками.

Объединение в самые последние годы физики и технологии наногетероструктур с нанотехнологией изготовления приборов на их основе привело к созданию наногетероструктурной электроники.

Элементарная база наногетероструктурных монолитных интегральных схем включает:

– униполярные полевые транзисторы с электронным газом высокой подвижности и высокой плотности, или HEMT (High Electron Mobility Transistor);

– гетеробиполярные транзисторы, т.е. HBT (Heterojunction Bipolar Transistor);

– туннельно-резонансные приборы на квантовых ямах, обладающие, наряду с рекордным быстродействием, уникальными функциональными возможностями;

– гетероструктурные транзисторы на квантовых точках (т.е. на квазиуменьшенных электронных системах);

– фотодетекторы и лазеры на квантовых точках.

Активно обсуждаются проблемы создания квантовых интегральных схем, основными элементами которых должны стать квантовые точки, квантовые проводники, квантовые ямы, транзисторные структуры на основе квантоворазмерных эффектов и устройств с управляемой интерференцией электронов.

Все перечисленное стало возможным лишь благодаря выдающимся достижениям в развитии технологии молекулярно-пучковой и МОС-гидридной эпитаксии, обеспечившим возможность синтеза высококачественных квантоворазмерных композиций широкого круга полупроводниковых материалов. Однако по существу развитие технологии и материаловедения наноструктур лишь только начинается. С материаловедческих позиций наноструктуры являются весьма специфическими объектами, свойства которых в значительной степени определяются свойствами их поверхности и явлениями, разыгрывающимися на границах раздела фаз. Все это определяет специфику межфазных взаимодействий и особенностей поведения примесей и структурных дефектов в наноразмерных многофазных композициях. Ключ к получению недеградирующих наноструктур с контролируемыми свойствами лежит в детальном исследовании всех этих явлений.

Решающую роль в формировании наноконпозиций типа сверхрешеток, состоящих из квантовых ям, проволок или точек, играют эффекты самоорганизации. Однако для того, чтобы обеспечить, например, получение композиций с однородным распределением необходимого количества квантовых точек контролируемого размера, надо иметь четкое представление о механизме явлений, лежащих в основе самопроизвольного возникновения макроскопического порядка в первоначально однородной системе, т.е. выявить основные движущие силы «самоорганизации». Для различных типов наноструктур причины неустойчивости однородного состояния системы могут су-

существенно различаться, и в каждом конкретном случае в этом надо детально разбираться. Только такого рода подходы позволяют с наибольшим эффектом реализовать возможности процессов самоорганизации. В последние годы исследования в этом направлении развиваются весьма успешно. Успешное развитие технологии и материаловедения полупроводниковых наноструктур вряд ли возможно без глубокого проникновения в природу явлений, разыгрывающихся в традиционных полупроводниковых средах на атомном (молекулярном) уровне. Это, в свою очередь, требует разработки новых нестандартных методов исследования с использованием сканирующей атомно-силовой и туннельной микроскопии, электронной микроскопии высокого разрешения, рентгеновской спектроскопии и ряда других современных подходов.

Развитие нанотехнологии требует применения достижений современной электронной нанолитографии для формирования малых размеров активных элементов.

Развитие методов литографии шло по пути уменьшения длины используемого излучения (ультрафиолетовое или синхротронное) и применения частиц с меньшей длиной волны (высокоэнергетичная электронная и ионная литография). Существенным ограничением методов оптической литографии является необходимость фокусировки света. От этого недостатка свободны методы ионной и электронной литографии.

Развитие нанотехнологий направлено на создание электронных устройств будущего, способных стать базой для дальнейшего развития информационных технологий. Увеличение мощностей компьютерных систем достигается уменьшением размеров применяющихся в настоящее время кремниевых интегральных схем. Однако по оценке ведущих международных исследовательских организаций, при сохранении современных темпов развития интегральных технологий через 10–15 лет будет достигнут предел микроминиатюризации. Дальнейшее повышение вычислительных мощностей компьютерных систем будет неразрывно связано с применением нанотехнологий.

Созданный в мире за предыдущие десятилетия научный и технологический задел дал мощный импульс быстрому, промышленному освоению этой новейшей технологии. Объем мировых ежегодных продаж только самих гетероструктурных транзисторов и монокристаллических интегральных схем (МИС) уже приблизился к 5...6 млрд долл., ежегодно увеличиваясь примерно на 3 %. По всем прогнозам, рынок

этих изделий на ближайшие 12–15 лет и далее будет оставаться наиболее привлекательным для инвестиций.

К настоящему времени налажено массовое производство широкого спектра гетероструктур, гетероструктурных транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС):

- наиболее массовой областью применения этой технологии остается сотовая связь, сейчас это цифровая связь 3-го поколения. Она занимает около 57 % «гетероструктурного» рынка. Гетеротранзисторы содержатся почти в каждом выпускаемом в мире сотовом телефоне;

- около 25 % рынка занимает быстро прогрессирующая (наиболее высокоскоростная) волоконно-оптическая связь, используются гетероструктурные МИС миллиметрового диапазона на частоты до 60 ГГц и выше. Активно ведутся разработки приборов на частоты до 100 ГГц и выше;

- около 12 % рынка принадлежат так называемой потребительской электронике, связанной с цифровым ТВ (частоты от 12 ГГц до 30...40 ГГц);

- наблюдается быстрый рост рынка гетероструктурных МИС на частоты 77 ГГц для автомобильных антистолкновительных радаров;

- быстро развивается и рынок СВЧ МИС для спутниковой связи на частоты до 60 ГГц;

- перспективной областью применения гетероструктурной СВЧ-электроники является беспроводная связь широкополосного доступа на частоты до 40...60 ГГц и выше (точка–точка, точка–много точек) с предоставлением услуг мультимедиа (передачи сложных изображений, видеоконференций, дистанционное обучение, высокоскоростной интернет и т.д.);

- 3...4 % рынка принадлежит военной электронике. Это в основном бортовые и мобильные наземные радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках (АФАР) X-диапазона (частота около 10 ГГц), для ведения разведки, обнаружения целей, наведения и сопровождения ракет, а также для радиоэлектронной борьбы.

Там где требуются рабочие частоты выше 4...5 ГГц, наногетероструктурная технология быстро вытесняет не только кремниевую технологию, но и более высокоскоростную арсенид галлиевую MESFET-технологию, захватывая все большую долю СВЧ-телекоммуникационного и радиолокационного мирового рынка.

Главными тенденциями развития гетероструктурной электроники в соответствии с растущими требованиями рынка являются:

– стремительное продвижение в более высокие частоты, т.е. в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны. Успехи, достигнутые здесь в освоении частот до 200...300 ГГц, базируются в значительной мере на технологии изоморфных, псевдоморфных и метаморфных гетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs в сочетании с нанометровой (20...50 нм) технологией изготовления приборов;

– тенденция к созданию мощных высокочастотных приборов (для передающих устройств) со все более высокой выходной мощностью $P_{\text{вых}}$ и КПД. Здесь наибольшие перспективы связываются с «широкозонной» гетеросистемой Al(In)GaN/Ga(In)N, где за счет большой ширины запрещенной зоны достигается удельная мощность, на порядок большая, чем в GaAs;

– особое и весьма существенное место в наногетероструктурной электронике и оптоэлектронике занимают гетероструктуры SiGe/Si, твердые растворы SiGe, напряженные сверхрешетки SiGe/Si, на основе которых реализуют полевые и биполярные наногетеротранзисторы. На квантовых точках Ge/Si прорабатывают создание фотоприемников и излучателей на длину волны 1,5 мкм, которая соответствует окну максимальной прозрачности оптических волноводов из кварцевого стекла;

– требования рынка по расширению функциональных возможностей СВЧ-приборов, уменьшению их массогабаритов, увеличению надежности и снижению стоимости стимулируют непрерывное увеличение степени интеграции наногетероструктурных МИС, т.е. создание многофункциональных МИС, объединяющих на одном чипе несколько различных по своим функциям приборов.

Достижения в разработке и изготовлении наноструктур различного назначения определяются уровнем развития нанотехнологий, которые позволяют получать их с атомной точностью и необходимым химическим составом. Нанотехнологии призваны решить следующие основные задачи современной полупроводниковой электроники: повышение производительности вычислительных систем и, в перспективе, создание квантового компьютера; увеличение пропускной способности каналов связи; увеличение информационной емкости и качества систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат; расширение возможностей сенсорных и энергосберегающих устройств; увеличение доли использования электронных и оптоэлектронных компонентов в биологических, медицинских, химических, машиностроительных и других технологиях.

2. БИПОЛЯРНЫЕ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ $\text{Si}/\text{Ge}_x \text{Si}_{1-x}$ И $A^{III}B^V$

В данной главе приведен анализ состояния разработок биполярных гетеропереходных транзисторов (БГТ) на основе твердых растворов $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, SiGe , нитридов III группы. Рассмотрены принцип действия и свойства БГТ, показано, что в результате односторонней инжекции через эмиттерный гетеропереход повышается усиление по току и предельная частота прибора. Выполнено сравнение параметров БГТ с теоретическими оценками. Рассмотрены элементы конструирования БГТ: градиент состава в переходе эмиттер-база (ЭБ), варизонная база, БГТ с двойным гетеропереходом, углеродное ограничение профиля бора в базе SiGe -БГТ. Продемонстрированы достижения современных БГТ, изготовленных на различных гетеропереходных парах. БГТ на SiGe и обычных материалах $A^{III}B^V$ обладают малыми шумами, высокими предельной частотой и усилением. Особые перспективы имеют InP -БГТ. Нитриды III группы ($\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$) являются также перспективными широкозонными материалами для БГТ, однако на пути их создания имеются определенные технологические трудности.

Идея использования широкозонного эмиттера для повышения коэффициента инжекции в транзисторе была предложена У.Б. Шокли еще в 1948 г. Однако реализации этой идеи в те времена не было уделено достаточного внимания. Это было связано с большими технологическими трудностями в получении гетеропереходов с малым числом дефектов на границе раздела, тогда как технология изготовления транзисторов с гомопереходами в то время развивалась успешно. Однако на пути улучшения параметров биполярных транзисторов (увеличения коэффициента усиления, предельной частоты) существуют определенные ограничения. Одним из них является невозможность применения сильнолегированной базы. С развитием технологии изготовления гетеропереходов снова возник интерес к биполярным транзисторам с гетеропереходами. Последнее десятилетие развития полупроводниковой электроники ознаменовалось бурным прогрессом в разработке и доведении до коммерческого выпуска биполярных гетеропереходных транзисторов на основе известных гетеропереходных пар Si/GeSi $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, InGaP/GaAs , а также попытками разработки БГТ на таких новых материалах, как нитриды III группы: GaN/SiC , $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$.

Отличительной особенностью БГТ является эмиттерный гетеропереход, составленный из широкозонного эмиттера и узкозонной базы. Коллекторный переход также может быть гетеропереходом. В настоящее время реализованы гетеропереходные транзисторные структуры на основе различных материалов. В табл. 2.1 приведены такие гетерокомпозиции.

Таблица 2.1

Гетерокомпозиции, на основе которых созданы биполярные гетеротранзисторы

Подложка	Эмиттер	База	Коллектор
GaAs	AlGaAs	GaAs или AlGaAs (с градиентом состава)	GaAs или AlGaAs (ДБГТ)
	GaInP	GaAs или AlGaAs (с градиентом состава)	GaAs или GaInP (ДБГТ)
InP	InP	InGaAs	InGaAs или InP (ДБГТ)
	AlInAs	InGaAs	InGaAs или InP (ДБГТ)
	InP	GaAsSb	InP (ДБГТ)
Si	Si/Поли-Si	Si-Ge (с градиентом состава)	Si
Al ₂ O ₃	AlGaN	GaN	GaN

Ниже дан обзор наиболее разработанных и перспективных БГТ-структур.

Целью данного раздела является анализ современного состояния разработок биполярных гетеропереходных транзисторов на материалах $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, SiGe и нитридах III группы, сравнение и оценка возможностей материалов и приборов на их основе.

2.1. Биполярный транзистор. Общая характеристика

Биполярный транзистор состоит из двух $p-n$ переходов, расположенных на близком расстоянии друг от друга: толщина базы – расстояние между ними, $W_b < L_{p,n}$ – меньше диффузионной длины неосновных носителей. При работе в активном режиме первый $p-n$ переход – ЭБ – смещен в прямом направлении, второй – БК – находится при обратном смещении. Неосновные носители, инжектированные в базу через ЭБ-переход, собираются благодаря диффузии или дрейфу в коллекторной области за коллекторным переходом. Базовый ток существует для рекомбинации в базе, инжекции неосновных носителей в эмиттер и для тока утечки через обратно смещенный переход БК. Свойства биполярного транзистора детально рассмотрены в [1, 2].

При рассмотрении усиления малого переменного сигнала вводят понятие коэффициента передачи тока эмиттера

$$\alpha = I_{\kappa} / I_{\text{э}} = \lambda \beta M ,$$

где $I_{\kappa}, I_{\text{э}}$ – токи коллектора и эмиттера соответственно;

χ – эффективность, или коэффициент инжекции, эмиттера;

β – коэффициент переноса, характеризующий рекомбинационные потери неосновных носителей в базе;

M – эффективность коллектора.

Для n - p - n транзистора

$$\chi = I_{n\text{э}} / I_{\text{э}} = 1 - \sigma_{\text{б}} W_{\text{б}} / \sigma_{\text{э}} L_p = 1 - \rho_{\text{э}} W_{\text{б}} / \rho_{\text{б}} L_p ,$$

$$\beta = I_{n\kappa} / I_{n\text{э}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_{\text{б}}}{L_n} \right) ,$$

где $I_{n\text{э}}, I_{n\kappa}$ – токи электронов, инжектируемые из эмиттера в базу и достигающие коллекторного перехода;

$\sigma_{\text{э,б}}$ и $\rho_{\text{э,б}}$ – проводимость и удельное сопротивление эмиттерной и базовой области;

$W_{\text{б}}$ – толщина базы;

$L_{n,p}$ – диффузионная длина неосновных носителей, электронов и дырок.

Эффективность коллектора M приравнивается единице.

Транзистор может работать в различных схемах включения, прежде всего в схемах с общей базой (ОБ) и с общим эмиттером (ОЭ).

Для схемы с ОБ коэффициент усиления по току

$$K_{I_{\text{об}}} = \alpha = I_{\kappa} / I_{\text{э}} < 1 .$$

Следовательно, усиление тока не происходит. Однако схема с ОБ позволяет получить усиление по напряжению.

В транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, входным током является ток базы, а выходным – ток коллектора. Коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ

$$K_{I_{\text{оэ}}} = B = I_{\kappa} / I_{\text{б}} = I_{\kappa} / (I_{\text{э}} - I_{\kappa}) = \alpha / (1 - \alpha) .$$

В схеме с ОЭ происходит усиление по току и напряжению.

В более общем случае рассматривают различные компоненты тока, протекающего через прибор в соответствии с рис. 2.1.

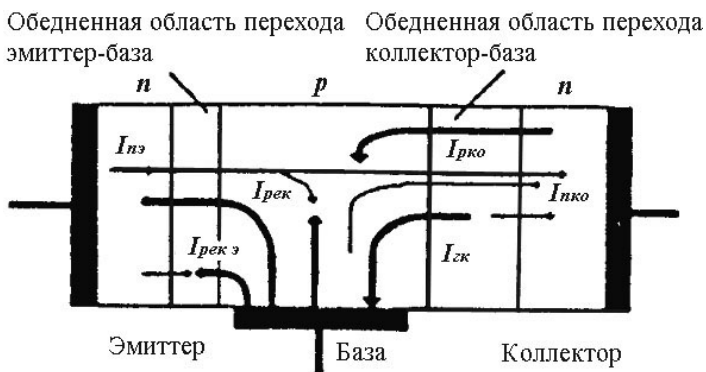


Рис. 2.1. Токвые составляющие в биполярном транзисторе

Тонкими линиями обозначены токи электронов, жирными – токи дырок. Предполагается прямое смещение перехода эмиттер-база и обратное – перехода коллектор-база.

Токи эмиттера $I_э$, базы $I_б$ и коллектора $I_к$ можно представить в виде

$$I_э = I_{нэ} + I_{рэ} + I_{рек.э},$$

$$I_к = I_{нэ} - I_{рек} + I_{гк},$$

$$I_б = I_{рэ} + I_{рек.э} - I_{гк} + I_{рек},$$

где $I_{нэ}$ – ток электронов, инжектированных из эмиттера;

$I_{рэ}$ – ток дырок, инжектируемых в эмиттер;

$I_{рек.э}$ – ток рекомбинации электронов и дырок, обусловленный рекомбинацией носителей заряда в прямосмещенном переходе эмиттер-база;

$I_{рек}$ – ток, обусловленный рекомбинацией носителей заряда в пассивных участках базы (вне обедненной области);

$I_{гк}$ – генерационный ток в обратносмещенном переходе коллектор-база.

Коэффициент усиления по току B в схеме с общим эмиттером определяется выражением