Гетероструктуры в полупроводниковой электронике

Вопросы к экзамену

- Гетероструктуры в полупроводниковой электронике.
- Полупроводниковые лазеры. Гетероструктуры в оптоэлектронике.

Классификация полупроводников и структур на их основе

Основной химический состав полупроводникового кристалла указывает химическая формула — символ элемента или формула соединения: Ge, Si, GaAs, SiC

Широко используются полупроводники на основе твердых растворов элементов или соединений. Состав твердого раствора определяют, указывая мольные доли компонентов.

Твердые растворы в системах кремний—германий — $Si_y Ge_{1-y}$, теллурид кадмия—теллурид ртути — $Cd_y Hg_{1-y}Te$, арсенид алюминия—арсенид галлия — $Al_y Ga_{1-y}As$

где *y* — мольная доля компонента в твердом растворе.

Химический состав полупроводника

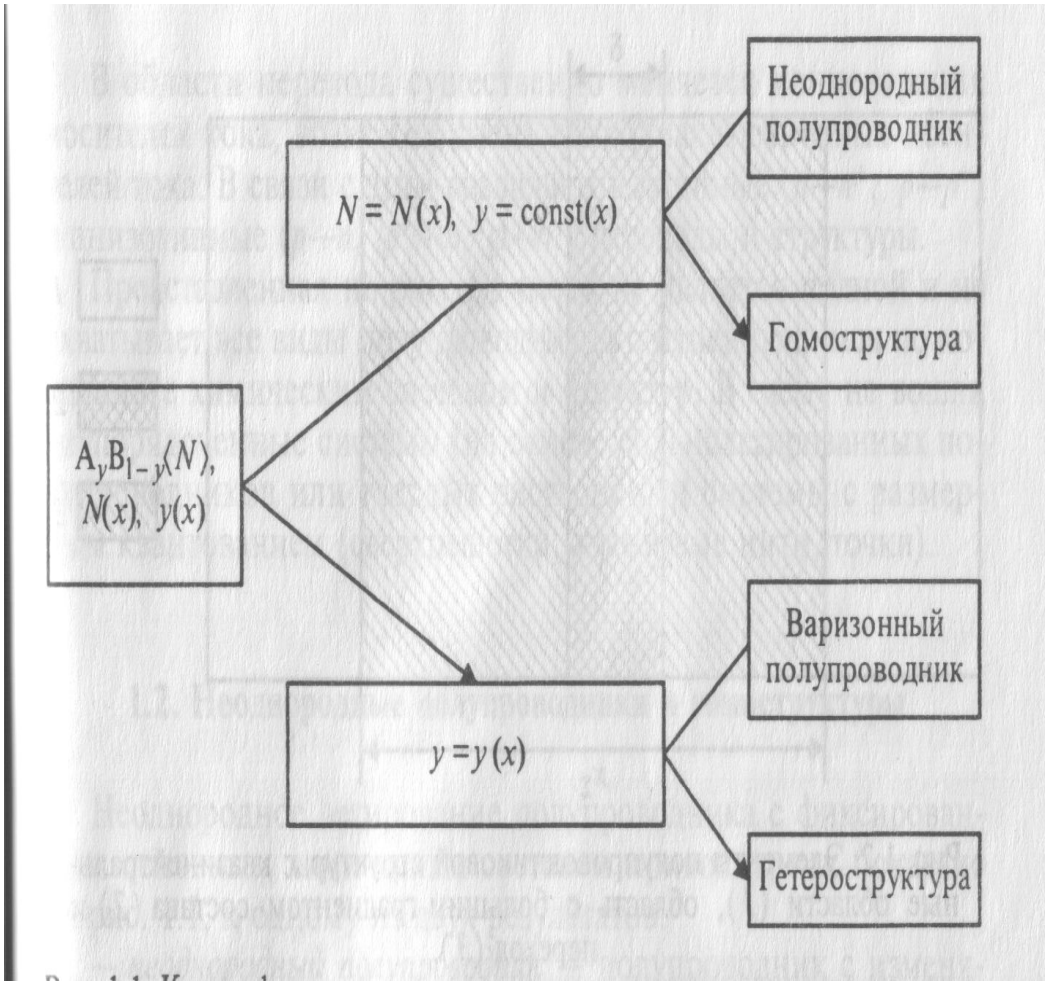
Основной химический состав полупроводников на основе твердых растворов может изменяться с координатой.

Наряду с компонентами основного химического состава полупроводник может содержать примесь. При неоднородном легировании химический состав полупроводника также изменяется с координатой.

Таким образом, химический состав полупроводника может изменяться с координатой вследствие изменения как основного химического состава, так и содержания примеси.

До тех пор пока изменение состава с координатой происходит плавно, сохраняется локальная связь между химическим составом и свойствами полупроводника.

Классификация полупроводников с изменяющимся по координате химическим составом и полупроводниковых структур



Полупроводниковый образец, содержащий область с большим градиентом химического состава, называют ***структурой***.

В структуре связь между химическим составом и свойствами полупроводника становится нелокальной, например концентрация носителей тока не соответствует локальному составу полупроводника

Полупроводниковые структуры

Гомоструктура — образец (полупроводник), в котором область с большим градиентом химического состава сформирована изменением концентрации примеси.

Гетероструктура — образец, в котором область с большим градиентом химического состава сформирована изменением основного химического состава.

Область гетероструктуры, в которой нарушена электронейтральность, называют ***гетеропереходом***.

Явление сверхинжекции

Позволяет улучшить параметры транзисторов.

При инжекции через *p—n*-переход носители преодолевают хотя и пониженный за счет прямого смещения, но все же конечный барьер *V*.

При этом концентрация инжектированных носителей всегда меньше, чем уровень легирования области, откуда идет инжекция (для невырожденных электронов в exp(V/ *kT)* раз).

При использовании гетероперехода и **инжекции носителей из широкозонного полупроводника в узкозонный**, соответствующее отношение концентраций в соседних областях равно

exp[(V- ΔE_i)/*kT*\, где ΔE_i — разрыв в соответствующей зоне.

Эффективность инжекции повышается в exp(ΔE_i / *kT*) раз

Применение гетероструктур в электронике

Высококачественные гетеропереходы в настоящее время изготавливаются в основном на базе соединений A_3B_5 (GaAs)

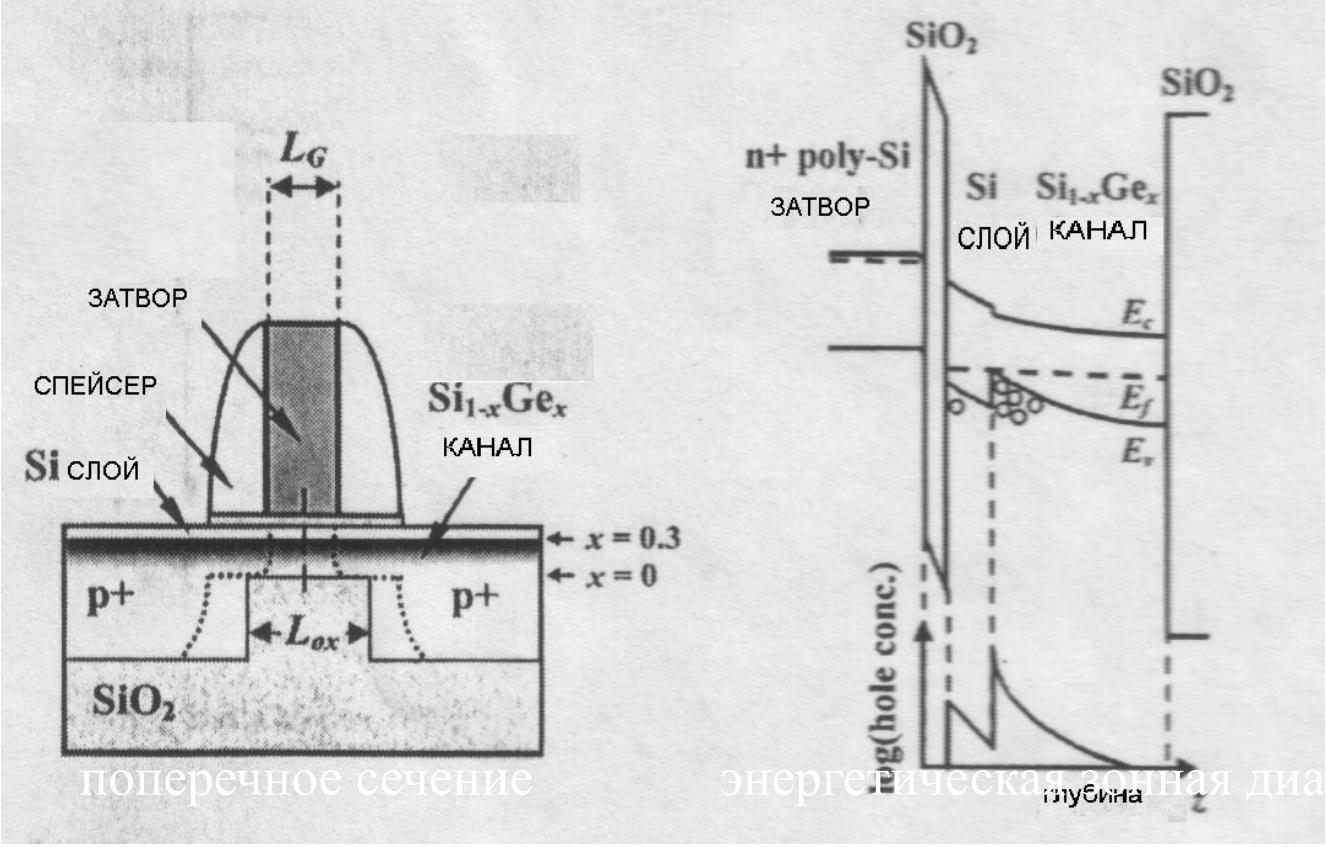
Биполярные гетеротранзисторы (HBT), использующие SiGe в качестве базовой области - малошумящие усилители и усилители мощности.

Объединение HBT на SiGe со стандартными КМОП и БиКМОП структурами - ИС обработки аналогового и смешанного сигналов для использования в радиопромышленности и связи

Использование деформированного SiGe в КМОП приборах повышает быстродействие *p* – канальных МОП структур почти на 20%.

Объединение сжатой SiGe пленки с кремнием под растягивающим напряжением с углубленным истоковым слоем *n* – или *p* – типа увеличивает эффективную подвижность в 4 раза.

Тонкопленочный МОП транзистор с каналом на основе SiGe гетероструктуры



поперечное сечение энергетическая зонная диа

SiGe ИС на рынке средств связи

Изделия на SiGe

Радио-, телекоммуникационное оборудование, средства сетевой передачи данных

Усилители мощности, малошумящие HBT, делители частоты

ИС для беспроводных средств связи

ИС для беспроводных высокоскоростных сетей

БиКМОП ИС для средств радиосвязи

Спутниковые телекоммуникационные ИС

ИС для аппаратуры автоматического контроля

БиКМОП ИС для базовых станций третьего поколения

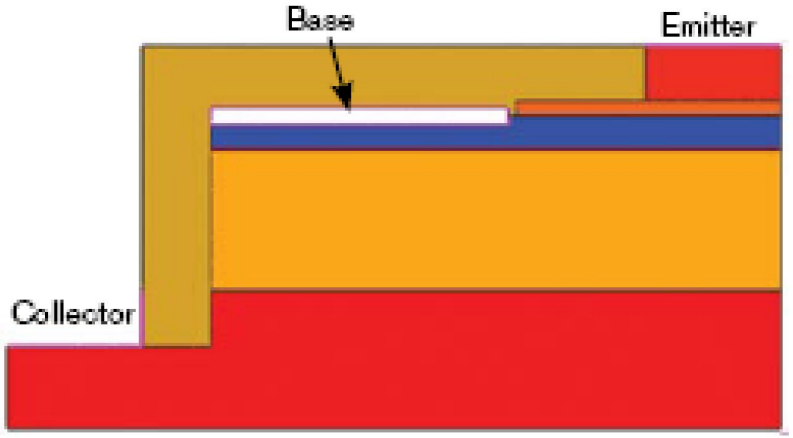
ИС для GPS приемников

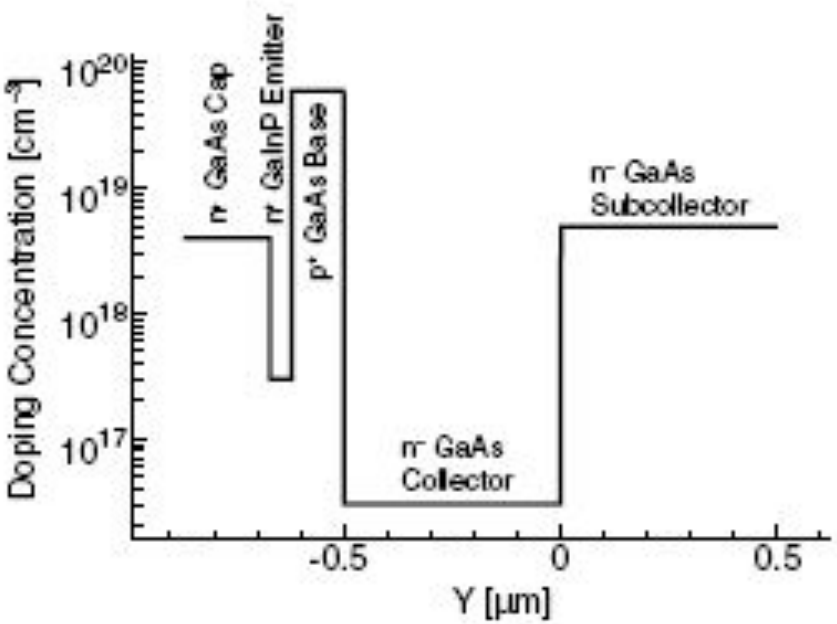
Гетеропереходные биполярные транзисторы на основе GaAs

Известные преимущества

- GaAs имеет более высокие значения предельной скорости и подвижности носителей, чем в кремнии
- Полевые транзисторы на GaAs отличаются очень низкими шумами по сравнению с кремниевыми транзисторами
- Использование GaAs является главным технологическим решением для коммерческих и военных применений в диапазоне от сотен МГц до миллиметровых длин волн

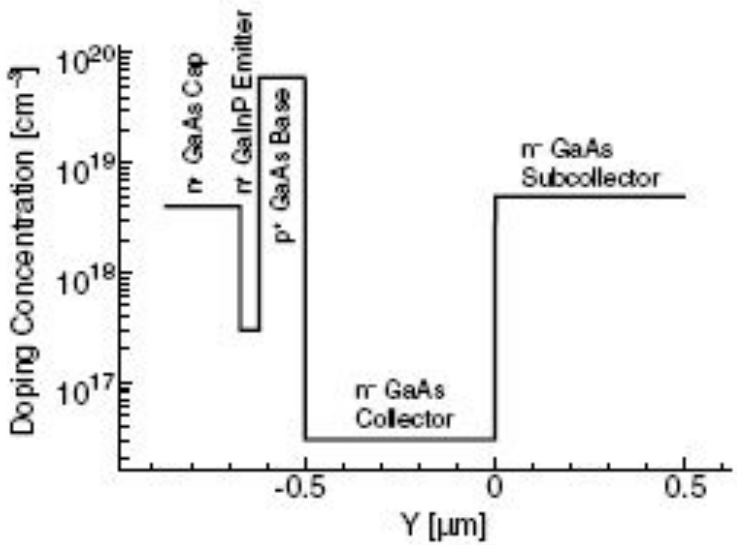
InGaP/GaAs HBT

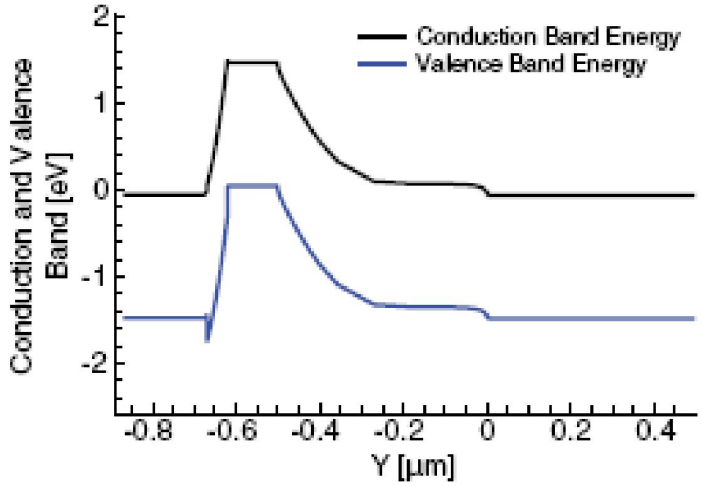


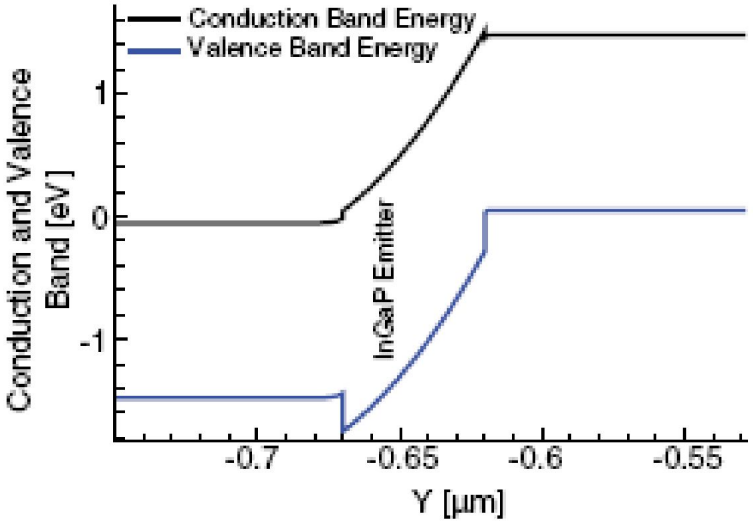


InGaP/GaAs обладает большей разницей в ширине запрещенной зоны и большей надежностью, чем структуры с AlGaAs эмиттером

Зонная диаграмма



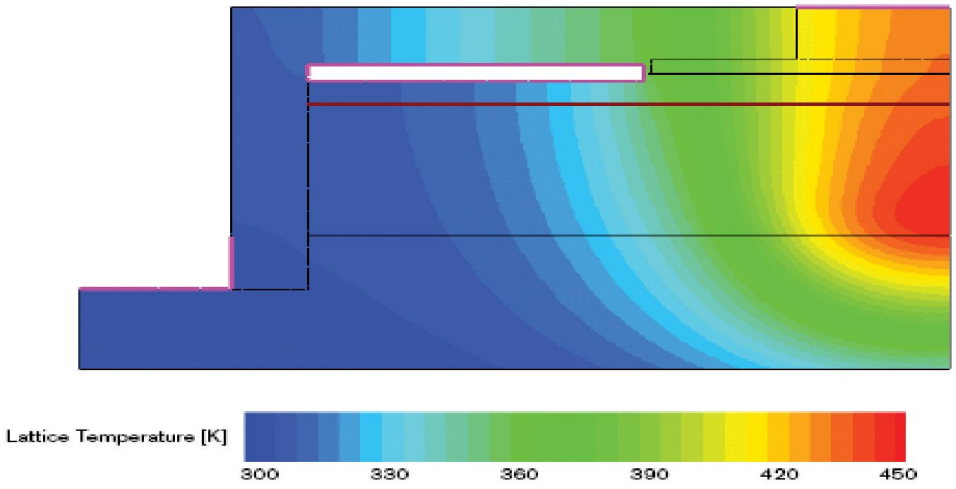




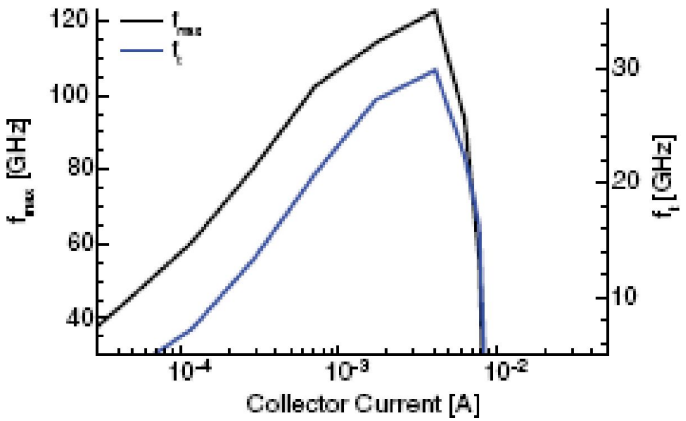
Зонная диаграмма в области эмиттера

Мольная доля In 0.49

Результаты моделирования



Температура решетки при I_b =0.8 мА, V_{ce} =5В



Граничная и максимальная частота при Vce =2В

Основная область использования гетероструктур - оптоэлектроника

Полупроводниковые лазеры

Волноводы

Приемники излучения

Оптоэлектронные приборы

В оптоэлектронных приборах основные процессы протекают с участием квантов света – фотонов. Оптоэлектронные приборы делят на **три группы**:

- Приборы, преобразующие электрическую энергию в оптическое излучение (светодиоды, полупроводниковые лазеры)
- Приборы, детектирующие оптические сигналы за счет протекающих под действием света электронных процессов (фотодетекторы)
- Приборы, осуществляющие преобразование оптического излучения в электрическую энергию (солнечные батареи)

Преобразование электрической энергии в оптическое излучение

Светодиоды и полупроводниковые лазеры принадлежат к классу люминесцентных приборов.

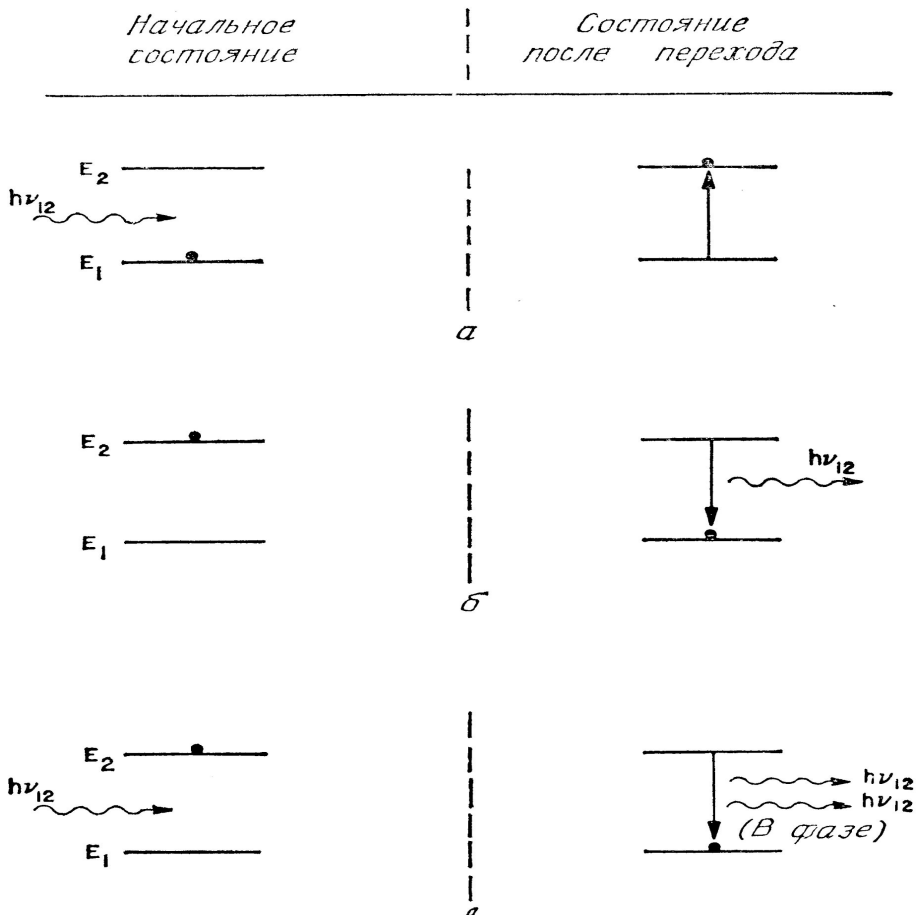
Люминесценция – оптическое излучение, возникающее в результате электронного возбуждения материала

Полупроводниковые лазеры испускают излучение, **когерентное в пространстве и во времени** (луч строго направленный и высокомонохроматичный).

Типы взаимодействия между фотонами и электронами в твердом теле:

- **Поглощение.** Фотон может поглотиться в результате перехода электрона из заполненного состояния валентной зоны в свободное состояние зоны проводимости
- **Стимулированное излучение.** Фотон может стимулировать излучение подобного себе фотона, вызывая переход электрона из заполненного состояния в зоне проводимости в свободное состояние валентной зоны
- **Спонтанная эмиссия.**Фотон может испускаться в результате спонтанных обратных переходов электронов из зоны проводимости на свободные состояния в валентной зоне

Модель основных процессов в полупроводниковом лазере



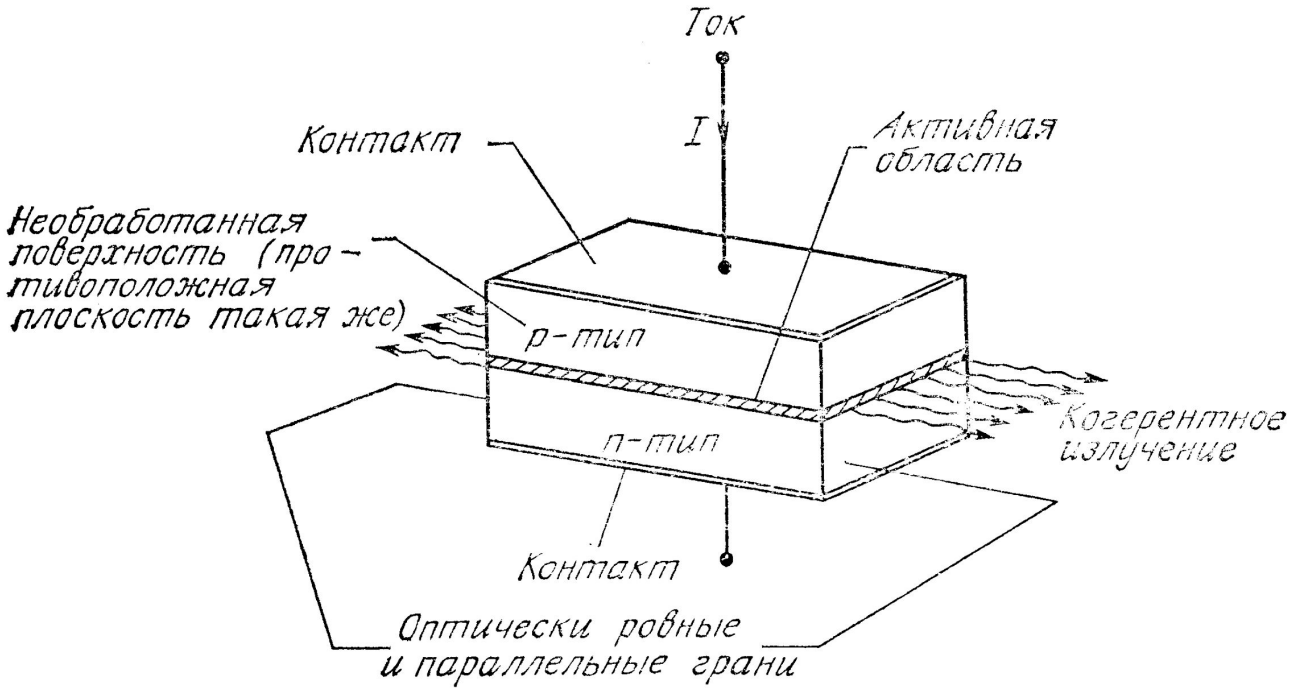
Поглощение

Спонтанное излучение

Стимулированное излучение

Столкновение фотона с атомом, находящимся в возбужденном состоянии, приводит к переходу атома в основное состояние с испусканием фотона с энергией и фазой, как у падающего излучения

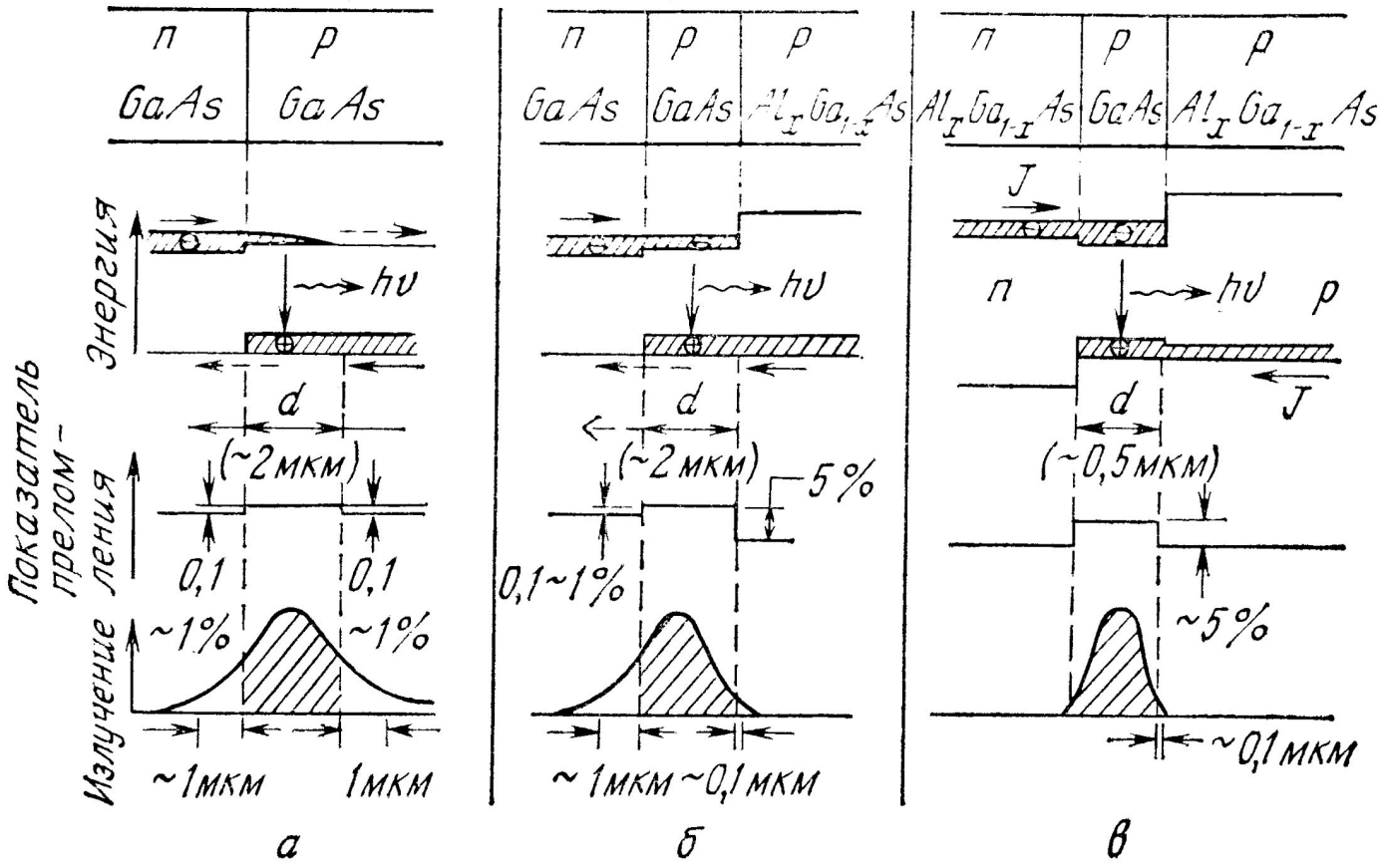
Основная структура полупроводникового лазера с p-n переходом в виде резонатора Фабри - Перо



При увеличении смещения на лазерном p-n переходе достигаются условия для перехода от спонтанного излучения к стимулированному.

Гетероструктуры позволяют за счет эффекта сверхинжекции достичь требуемого уровня инверсной заселенности зоны проводимости при меньших токах через p-n переход

Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах

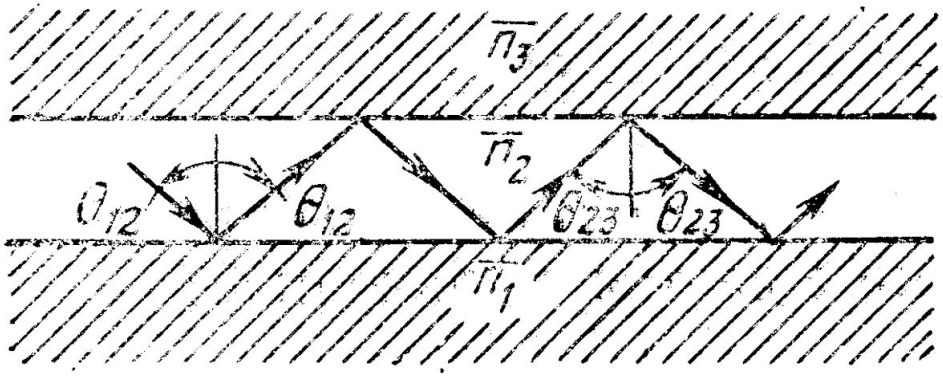


а – гомоструктура (p-n переход); б – структура с одним гетеропереходом; в – структура с двумя гетеропереходами

Волноводный эффект

В структуре с двумя гетеропереходами носители сосредоточены внутри активной области, ограниченной потенциальными барьерами.

Излучение ограничено той же областью из-за соответствующих показателей преломления.



Если показатель преломления активной области больше показателей преломления окружающих областей, то излучение распространяется в направлении, параллельном границам раздела слоев.

Фотодетекторы

- Фотодектирование основано на эффектах фотоэмиссии и фотопроводимости
- Фотоэмиссия – испускание электронов катодом из фоточувствительного материала (металлы Li, Na, K) под действием света, улавливаемых анодом
- Эффект фотопроводимости позволяет использовать изменения в сопротивлении фоточувствительного материала для определения начальной энергии кванта света

Приемники излучения

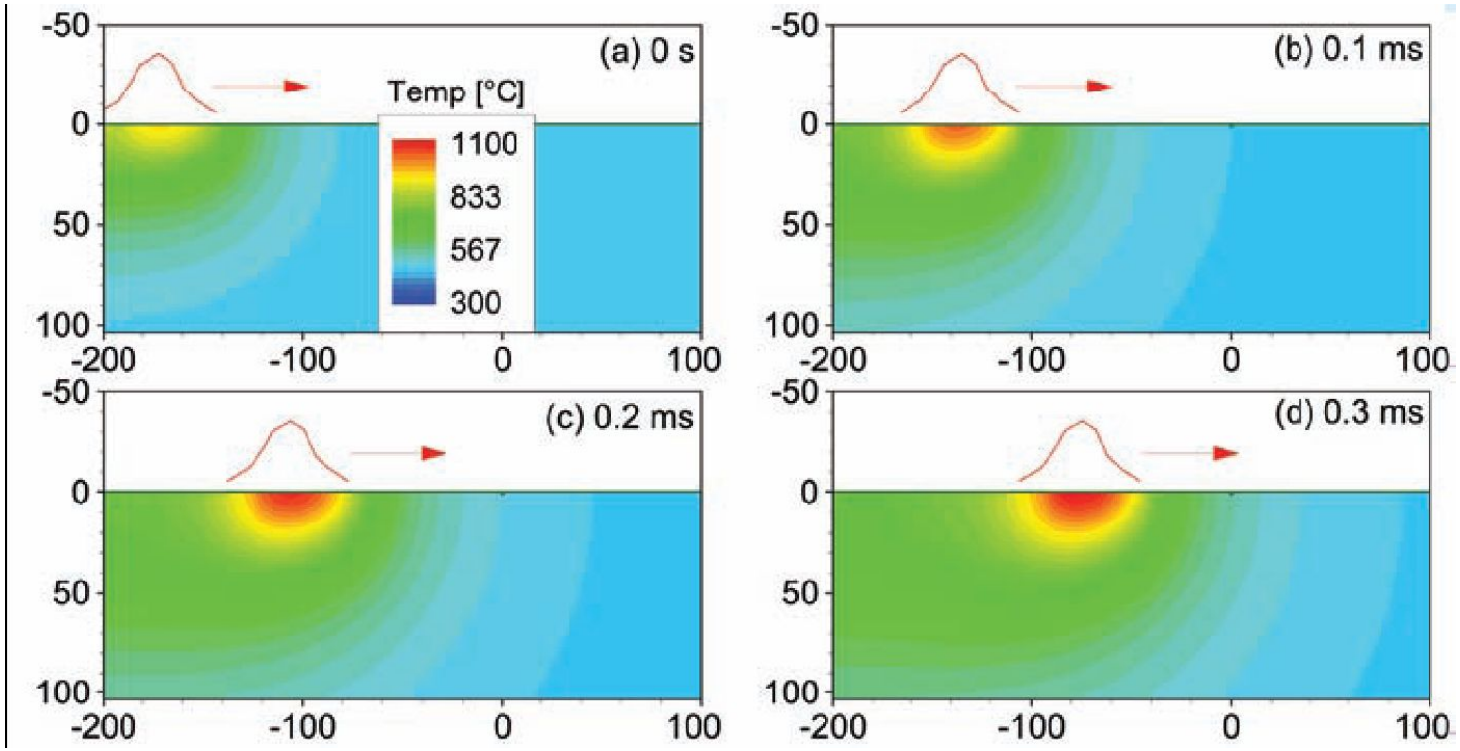
Использование гетероструктур позволяет менять ширину запрещенной зоны, обеспечивая требуемый спектр чувствительности, и создавать эффект окна.

Пусть гетеропереход освещается со стороны широкозонного материала. Если энергия светового кванта лежит в диапазоне между ширинами запрещенной зоны узко- и широкозонного материалов, то свет проходит черех широкозонный слой без поглощения.

Образование электронно-дырочных пар происходит в узкозонном материале в глубине прибора.

Эффектом поверхностной рекомбинации можно пренебречь.

Сканирующий лазерный отжиг



Температура при сканирующем лазерном отжиге в различные моменты времени: (a) t = 0 с, (b) t = 0.1 мс, (c) t = 0.2 мс, (d) t = 0.3 мс.