**Занятие 1. Полупроводниковые гетероструктуры. Электролюминесценция**

Одним из центральных понятий физики твердого тела является ЭНЕРГИЯ ФЕРМИ (или положение уровня Ферми, уровень Ферми). Электроны и дырки в полупроводниках подчиняются статистике Ферми-Дирака – функция Ферми-Дирака задает вероятность того, что при температуре Т состояние с энергией Е будет занято.

Уровень Ферми есть химический потенциал частиц в системе – описывает количество энергии, которое должно быть потрачено для того, чтобы добавить одну частицу в систему. В состоянии термодинамического равновесия химический потенциал будет одинаковым для всех частиц и одинаков по всей структуре.

При определении положения уровня Ферми в полупроводнике возможны две ситуации: уровень Ферми расположен в запрещенной зоне полупроводника, уровень Ферми расположен в зоне разрешенных состояний (в зоне проводимости или валентной зоне).

Расположение уровня Ферми в зоне разрешенных состояний характерно для вырожденных систем. К их числу относятся металлы и сильно легированные полупроводники. Для таких систем число носителей не является функцией температуры.

В случае расположения уровня Ферми в запрещенной зоне вероятность заполнения электроном может быть найдена как:

Вероятность заполнения дыркой равна вероятности того, что состояние не занято электроном:

Полупроводник становится вырожденным, как только концентрация электронов (или дырок) превысит эффективную плотность состояний (уровень Ферми проникнет в одну из зон). Плотность состояний, фактически, является статистическим параметром и определяет число энергетических уровней в единичном интервале энергий, приходящееся на единицу объема. Уровень Ферми можно рассматривать как меру плотности заселенности на энергетической шкале. Поскольку в термодинамическом равновесии химический потенциал имеет постоянное значение, произведение концентрации электронов и дырок не зависит от уровня Ферми.

Данное выражение – закон действующих масс – устанавливает взаимосвязь между концентрациями электронов и дырок в равновесных условиях.

**Задачи для решения**

1. Определить положение уровня Ферми, построить график зависимости положения уровня Ферми от концентрации носителей при температуре Т=300К.

Концентрация носителей изменяется в диапазоне 1015 до 1019 см-3.

Уровень Ферми EF и концентрация носителей (электронов n или дырок p) связаны выражениями:

где NC, NV – эффективные плотности состояний в полупроводниках.

где m\*C,V – эффективная масса электронов и дырок.

Для решения задачи может быть оценено как непосредственное положение уровня Ферми EF, так и его положение относительно зоны проводимости/валентной зоны EF-EC (EV-EF).

2. Определить концентрацию носителей, соответствующую положению уровня Ферми, отстоящему на 20 мэВ вглубь зоны проводимости сильно легированного полупроводника.

Для вырожденных систем (металлы и сильно легированные полупроводники) концентрация носителей может быть найдена как:

*При данной концентрации носителей полупроводник будет вести себя как металл, а его уровень Ферми будет заполнен даже при температуре абсолютного нуля!*

При введении в полупроводник определенного уровня химических примесей, они могут занимать узлы в кристаллической решетке полупроводника, вызывая гибридизацию волновых функций с атомами основной матрицы материала, что приводит к появлению избыточных электронов в зоне проводимости или захвату электронов из кристаллической матрицы (в валентной зоне высвобождаются дырки). Такие примеси ведут себя как водородоподобные примесные центры, связывающие электроны и дырки кулоновским потенциалом (следовательно, существует характерная энергия ионизации).

3. Определить энергию ионизации примеси в легированном полупроводнике.

где m\* - эффективная масса, εR – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника.

|  |  |
| --- | --- |
| Вариант 1 | GaP |
| Вариант 2 | InAs |
| Вариант 3 | GaSb |
| Вариант 4 | InP |
| Вариант 5 | AlGaAs |
| Вариант 6 | GaAs |
| Вариант 7 | InSb |
| Вариант 8 | GaAsSb |
| Вариант 9 | GaN |
| Вариант 10 | InN |
| Вариант 11 | AlAs |
| Вариант 12 | Si |
| Вариант 13 | Ge |

**Занятие 2. Лазерный резонатор. Пороговое условие лазерной генерации**

Одним из ключевых элементов конструкции лазера является резонатор, обеспечивающий обратную оптическую связь. Существует множество методов обеспечения обратной связи и исполнения резонаторов, простейшим из которых является использование плоскопараллельных зеркал или, в случае полупроводниковых лазеров, границы раздела полупроводник\воздух. Коэффициент отражения естественного зеркала на границе раздела может быть найден как:

**Задача:** определить коэффициент отражения зеркала на границе полупроводник\воздух в соответствии с вариантами из занятия 1.

ВАЖНЫЙ ВЫВОД: Использование сильно отражающих зеркал не является обязательным требованием для наблюдения лазерной генерации в полупроводниковых лазерах (усиление в полупроводниковых лазерах может достигать нескольких тысяч см-1). Большое усиление обеспечивается за счет:

- Концентрация имеющихся центров излучения (несколько 1018 см-3) намного превосходит уровни в газовых средах (1015 см-3);

- Оптические поперечные сечения намного больше для электронов в зонах по сравнению с электронами на атомных орбиталях. Таким образом, излучательное время жизни в полупроводниках составляет несколько наносекунд (в газовых – 1 мс).

Работа лазерного резонатора связана с возникновением нескольких видов потерь:

- Собственные потери αm обусловленные потерей фотонов при прохождении через зеркала (в том числе потери на вывод излучения):

где L – длина резонатора.

**Задача:** построить график зависимости уровня собственных потерь в случае, если одно из зеркал является полностью отражающим («глухим»), прочие параметры заданы таблицей вариантов:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Rm2 | L, мкм |
| Вариант 1 | 0,2 | 500-1500 |
| Вариант 2 | 0,22 | 550-1550 |
| Вариант 3 | 0,24 | 600-1600 |
| Вариант 4 | 0,26 | 650-1650 |
| Вариант 5 | 0,32 | 700-1700 |
| Вариант 6 | 0,34 | 750-1750 |
| Вариант 7 | 0,36 | 800-1800 |
| Вариант 8 | 0,38 | 850-1850 |
| Вариант 9 | 0,42 | 900-1900 |
| Вариант 10 | 0,44 | 950-1950 |
| Вариант 11 | 0,46 | 1000-2000 |
| Вариант 12 | 0,48 | 300-1300 |
| Вариант 13 | 0,5 | 400-1400 |

- Паразитные потери αp обусловленные поглощением свободных носителей в контактных слоях, рассеянием на шероховатостях и т.д.

Условие лазерного порога определяется потерями, а также долей энергии, эффективно присутствующей в области усиления (определяется коэффициентом ограничения Г).

Пороговое условие:

Фотонное время жизни в резонаторе будет определяться выражением:

где c` - скорость света в полупроводнике.

**Задача:** определить фотонное время жизни в предположении нулевых паразитных потерь в соответствии с таблицей вариантов:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Rm1 | Rm2 | L, мкм |
| Вариант 1 | 1 | 0,2 | 500 |
| Вариант 2 | 0,99 | 0,23 | 550 |
| Вариант 3 | 0,98 | 0,26 | 600 |
| Вариант 4 | 0,97 | 0,3 | 650 |
| Вариант 5 | 0,96 | 0,33 | 700 |
| Вариант 6 | 0,95 | 0,36 | 750 |
| Вариант 7 | 0,94 | 0,39 | 800 |
| Вариант 8 | 0,93 | 0,42 | 850 |
| Вариант 9 | 0,92 | 0,45 | 900 |
| Вариант 10 | 0,91 | 0,48 | 950 |
| Вариант 11 | 0,9 | 0,51 | 1000 |
| Вариант 12 | 0,89 | 0,54 | 1100 |
| Вариант 13 | 0,88 | 0,57 | 1200 |

Еще одним возможным способом реализации резонатора является применение распределенных брэгговских отражателей (например, для создания резонаторов вертикально-излучающих лазеров).

**Задача:** постройте график зависимости величины коэффициента отражения распределенного брэгговского отражателя от числа двойных слоев GaAs/AlGaAs. Определите полную толщину распределенного брэгговского отражателя на основе двойных слоев GaAs/AlGaAs, обладающего коэффициентом отражения не ниже 98%. Определить время, затрачиваемое на синтез рассчитанной структуры, при условии, что скорость выращивания слоев составляет 1 мкм/ч.

|  |  |
| --- | --- |
| Необходимая толщина каждого слоя GaAs, Å | 757 |
| Показатель преломления GaAs | 3,3 |
| Необходимая толщина каждого слоя AlGaAs, Å | 862 |
| Показатель преломления AlGaAs | 2,9 |

Величина коэффициента отражения распределенного брэгговского отражателя, состоящего из последовательности из *N* двойных диэлектрических слоев, может быть определена как:

где *n1,2* – показатели преломления слоев.

**Перечень полезный источников**

Хранилище с книгами на различные темы:

<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1zIGSJzH7S0yRxT88yjlkm702axdDcPWd>  
  
Физические свойства полупроводников (база данных):

<http://www.matprop.ru/>

Многие свойства полупроводниковых материалов могут быть найдены в книге:

Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника (доступна в хранилище с книгами)

**Занятие 3**

Лазерный диод ниже порога прозрачности ведет себя аналогично светоизлучающему диоду, высвобождая оптическую мощность во всех доступных направлениях. До достижения порога лазерной генерации (между порогом прозрачности и порогом генерации) стимулированное излучение доминирует над спонтанной эмиссией, излучательная эмиссия при обретает направленность ввиду того, что возрастает усиление вдоль оси лазерного диода. Как только превышается порог лазерной генерации, концентрации носителей в переходе становятся фиксированными (фиксируются на пороговой величине) – выполняется условие равенства внутрирезонаторных потерь и усиления. Как только плотность тока превышает величину плотности порогового тока, квантовая эффективность лазерного диода начинает стремиться к 1.

Внутренняя квантовая эффективность ηi описывает влияние механизмов поверхностной рекомбинации, баллистических электронов, распространяющихся без рекомбинации и прочих механизмов потерь на величину тока утечки.

Внешняя квантовая эффективность, определяемая внутренней квантовой эффективностью, собственными и паразитными потерями определяет влияние потерь на преобразование накачки в выходной сигнал.

Дифференциальная квантовая эффективность ηD характеризует изменение выходящего из резонатора потока фотонов вследствие изменения плотности тока накачки и может быть определена как:

Выходная мощность лазерного диода может быть определена как произведение энергии одного фотона hν на плотность фотонов в резонаторе s, эффективный объем моды и скорость высвобождения фотонов (скорость ухода фотонов). Таким образом выходная мощность может быть определена как:

где w – ширина резонатора, d – эффективная глубина моды, αm – собственные потери в резонаторе, с – скорость света в вакууме, nsc – показатель преломления полупроводникового материала, L – длина резонатора.

Колебательный обмен энергией между электронно-дырочными парами и фотонной заселенностью, охваченными взаимодействием через стимулированное излучение, являются причиной колебаний и релаксации квантово-механической системы лазерного диода, что приводит к возникновению гармонического отклика, достигающего своего максимума на частоте релаксации. По мере того, как увеличивается плотность электронно-дырочных пар, возрастает усиление, что приводит к увеличению фотонной плотности, что приводит к повышению скорости стимулированного излучения, которое уменьшает концентрацию носителей вследствие рекомбинации – возникают колебания параметров. Релаксация, описываемая фотонным временем жизни, возникает из-за потери фотонов за счет потерь на зеркалах и паразитных потерь. Релаксационная частота fR может быть определена как:

где τс – фотонное время жизни (время жизни фотона в резонаторе).

**Задача:** определить плотность фотонов в резонаторе полупроводникового гетеролазера GaAs/AlGaAs.

|  |  |
| --- | --- |
| Выходная мощность *Pout*, мВт | В соответствии с вариантами |
| Энергия фотонов *hν*, эВ | 1,4 |
| Коэффициент отражения «глухого» зеркала *Rm1* | 1 |
| Коэффициент отражения выходного зеркала *Rm2* | В соответствии с вариантами |
| Ширина резонатора *w*, мкм | 2 |
| Эффективная глубина моды *d*, мкм | 0,1 |
| Длина резонатора *L*, мкм | В соответствии с вариантами |
| Паразитные потери *αp*, см-1 | 10 |
| Коэффициент преломления *nsc* | 3,3 |
| Динамическое усиление *g*, см2 | 3·10-16 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Выходная мощность, мВт | Коэффициент отражения выходного зеркала *Rm2* | Длина резонатора *L*, мкм |
| Вариант 1 | 5 | 0,2 | 200 |
| Вариант 2 | 6 | 0,21 | 230 |
| Вариант 3 | 7 | 0,22 | 260 |
| Вариант 4 | 8 | 0,23 | 300 |
| Вариант 5 | 9 | 0,24 | 330 |
| Вариант 6 | 10 | 0,25 | 360 |
| Вариант 7 | 11 | 0,26 | 400 |
| Вариант 8 | 12 | 0,27 | 430 |
| Вариант 9 | 13 | 0,28 | 460 |
| Вариант 10 | 14 | 0,29 | 500 |
| Вариант 11 | 15 | 0,3 | 525 |
| Вариант 12 | 16 | 0,31 | 550 |
| Вариант 13 | 17 | 0,32 | 600 |

**Задача:** определить дифференциальную квантовую эффективность гетеролазера GaAs/AlGaAs, если его внутренняя квантовая эффективность составляет 60% (в соответствии с вариантами).

**Задача:** определить релаксационную частоту полупроводникового гетеролазера GaAs/AlGaAs (в соответствии с вариантами).

**Занятие 4**

Лазерный диод является рассогласованным лазерным резонатором, в котором случайные переменные амплитуды и фазы коррелируют друг с другом за счет связанных изменений усиления и коэффициента оптического преломления. Флуктуации коэффициента оптического преломления полупроводника также приводят к флуктуациям резонансной волны резонатора, что обуславливает уширение лазерной линии – *уникальный эффект, наблюдаемый в динамике именно полупроводниковых лазеров*. Ширина линии излучения полупроводникового лазера может быть оценена как:

где βс – коэффициент уширения линии.

**Задача:** определить ширину линии излучения полупроводникового лазера, одно из зеркал которого является «глухим» (в соответствии с вариантами).

|  |  |
| --- | --- |
| Длина волны излучения, нм | 1310 |
| Коэффициент паразитных потерь αр, см-1 | 10 |
| Показатель преломления nsc | 3,3 |
| Выходная мощность Pout, мВт | 1 |
| Коэффициент уширения линии βс | 5 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Коэффициент отражения выходного зеркала *Rm2* | Длина резонатора *L*, мкм |
| Вариант 1 | 0,2 | 200 |
| Вариант 2 | 0,21 | 230 |
| Вариант 3 | 0,22 | 260 |
| Вариант 4 | 0,23 | 300 |
| Вариант 5 | 0,24 | 330 |
| Вариант 6 | 0,25 | 360 |
| Вариант 7 | 0,26 | 400 |
| Вариант 8 | 0,27 | 430 |
| Вариант 9 | 0,28 | 460 |
| Вариант 10 | 0,29 | 500 |
| Вариант 11 | 0,3 | 525 |
| Вариант 12 | 0,31 | 550 |
| Вариант 13 | 0,32 | 600 |

Выходной пучок лазерного диода формируется фотонами, излученными в активной области и вышедшими за пределы резонатора через выходное зеркало. По мере удаления от выходного зеркала пучок претерпевает расширение в пространстве. В большинстве случаев вызывает интерес область, достаточно удаленная от выходного зеркала лазера, так что сам лазер может быть приближенно рассмотрен как точечный источник излучения (расстояние от лазера до точки наблюдения намного превышает длину волны).

В лазерной физике принято работать с гауссовыми пучками, что обусловлено простотой установления соотношений между ближним и дальнем полем излучения, между пространственной шириной лазерной моды и угловой расходимостью излучения лазера.

Зависимость радиуса гауссова пучка от пространственной координаты *r(x)* описывается выражением:

где *r0* - радиус гауссова пучка в перетяжке, *λ* – длина волны излучения лазера.

Радиус пучка отличается в разных точках вдоль оси распространения лазерного излучения. Координата сечения с наименьшим радиусом называется перетяжкой пучка, этот самый радиус – радиусом пучка в перетяжке. В большинстве случаев перетяжка лазерного пучка располагается на выходном зеркале, однако она может быть также смещена внутрь резонатора. Более того, координата, соответствующая перетяжке, может отличаться для двух поперечных направлений – так называемый *астигматизм*. Астигматизм проявляется в возникновении двух фокусных точек после прохождения излучения через фокусирующую линзу. Следует отметить, что только фундаментальная поперечная мода может быть с достаточной степенью точности аппроксимирована функцией Гаусса.

**Задача:** построить графики зависимости радиуса лазерного пучка от пространственной координаты для случаев *r0* = 100 мкм, *r0* = 50 мкм, *r0* = 10 мкм. Расчет производить для лазеров с длинами волн излучения 810 нм, 1300 нм и 1550 нм. Построить графики зависимости эффективного радиуса пучка *r(x)/r0*от осевой координаты *x/xR* для каждого из обозначенных случаев. В ходе моделирования считать лазерный пучок гауссовым. Пространственные координаты изменяются в диапазоне от 0 до 10 м.