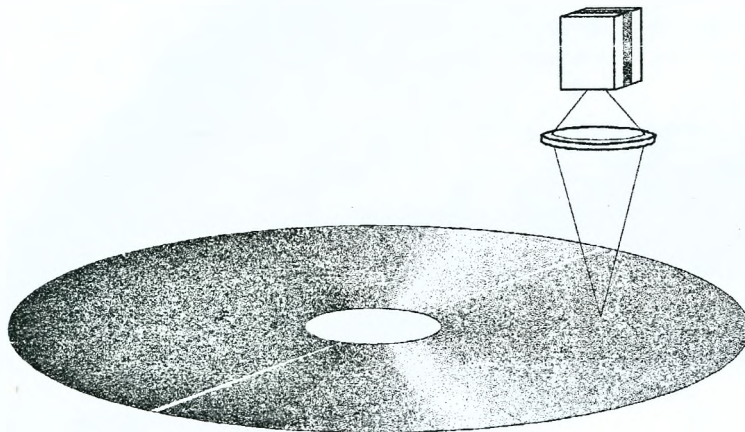


Министерство образования Республики Беларусь
Брестский политехнический институт
Кафедра физики

Лабораторные работы по оптике
и квантовой физике



ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Лабораторная работа К6

Брест 2000

УДК 535 (076.5)

Методические указания по выполнению лабораторной работы К6
“ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА”, Брест, БПИ, 2000

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы К6 “ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА”, в которой экспериментально изучаются вольт-амперные и ватт-амперные характеристики инжекционного полупроводникового лазера.

Лабораторная работа предназначена для студентов всех инженерных специальностей и всех форм обучения в БПИ.

Авторы: А.А. Гладышук, зав. кафедрой физики, к.ф.-м.н.
К.И. Русаков, доцент, к.ф.-м.н.
А.С. Смаль, ассистент

Рецензент: В.М. Косарев, к.ф.м.-н., доцент, Брестский государственный университет

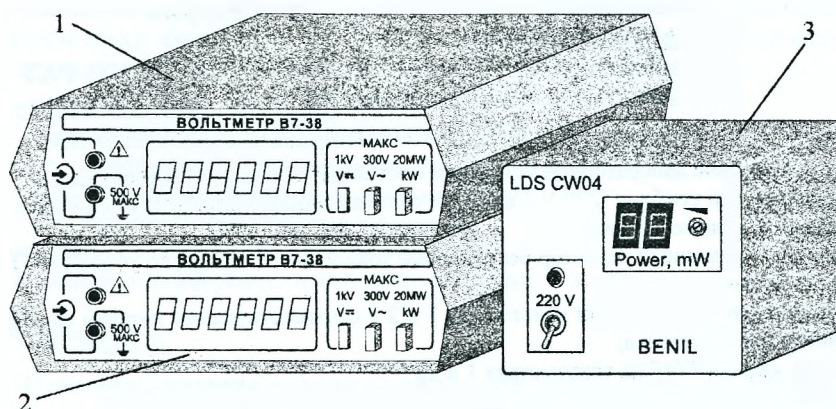
Рекомендовано к изданию
кафедрой физики БПИ
14.01.2000

© Брестский политехнический институт 2000

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА К6

“ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА”.

<u>Цель работы:</u>	изучение основных принципов работы полупроводникового инжекционного лазера; определение порогового тока инжекции ($I_{пор}$) из зависимости мощности генерации от величины тока, протекающего через лазер; определение к.п.д. полупроводникового инжекционного лазера.
<u>Приборы и Принадлежности:</u>	Установка LDS/CW 04 для исследований параметров инжекционного лазера; два вольтметра В7-38; соединительные провода.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

Установка LDS/CW 04 предназначена для исследований параметров инжекционных лазеров, работающих в непрерывном режиме.

Конструктивно установка выполнена в виде блока питания лазера типа ИЛПН - 108, который размещен в корпусе блока питания. С излучателем лазера совмещен фотодиод для регистрации мощности излучения. Величина мощности излучения (в миллиВаттах) выводится на цифровой индикатор, расположенный на передней панели прибора. Для контроля электрических параметров инжекционного лазера на задней панели прибора выведены гнезда для подключения внешних вольтметров:

- “ток” - для измерения тока накачки; напряжение снимается с нагрузочного сопротивления 1 Ом;
- “напряжение” - для измерения разности потенциалов на электродах инжекционного лазера.

Цифрами на лабораторной установке отмечены:

- 1 – вольтметр для измерения напряжения на лазере;
- 2 – вольтметр для измерения тока накачки лазера;
- 3 – блок питания полупроводникового лазера.

В вольтметрах 1 и 2 имеются следующие кнопки:
 $V=$ – для измерения напряжения при постоянном токе;
 $V\sim$ – для измерения напряжения при переменном токе;
 $k\Omega$ – для измерения сопротивления.

На передней панели установки LDS/CW 04 слева находится тумблер: "220 V", над которым помещен светодиод для индикации включения сети. В правой части передней панели прибора находится цифровой индикатор мощности генерации лазера с надписью: "POWER, mW". Рядом с ним выведена под шлиц регулировочная ось переменного резистора для изменения тока накачки лазера. Полупроводниковый лазер заключен в металлическую оправу для отвода тепла, вставленную во фторопластовый цилиндр, который находится внутри корпуса блока питания. Внутри фторопластового цилиндра, в его торце, находится фотоприемник, регистрирующий излучение лазера. Длина волны излучения инжекционного полупроводникового лазера ИШПН - 108, применяемого в работе, лежит в пределах 810-850 нм.

Порядок включения и выключения лабораторной установки.

ВНИМАНИЕ: Во избежание выхода лазера из строя изменять порядок включения и выключения установки строго **ЗАПРЕЩАЕТСЯ**.
 Лабораторную установку включать **ТОЛЬКО С РАЗРЕШЕНИЯ** преподавателя. **Входные клеммы вольтметров должны быть изолированы от земляной шины!**

Включение лабораторной установки производить в следующем порядке:

- убедиться, что тумблер "220 V" на блоке питания лазера находится в выключенном положении (положение вниз);
- вывести переменный резистор регулировки тока накачки лазера до упора ПРОТИВ часовой стрелки;
- проверить, подключены ли вольтметры 1 и 2 к соответствующим гнездам на задней панели блока питания;
- нажать кнопки " $V=$ " на вольтметрах 1 и 2;
- убедиться, что кнопки " $V=$ " на вольтметрах 1 и 2 зафиксированы;
- подключить к сети сетевые шнуры вольтметров 1, 2 и блока питания лазера;
- включить тумблер "220 V" на блоке питания лазера.

Выключение лабораторной установки производить в следующем порядке:

- вывести переменный резистор регулировки тока накачки лазера до упора ПРОТИВ часовой стрелки;
- выключить тумблер "220 V";
- вынуть из розеток сетевые шнуры вольтметров 1, 2 и блока питания лазера 3.

ЗАМЕЧАНИЕ: Для измерения тока накачки используется вольтметр 2. Поскольку напряжение снимается с нагрузочного резистора с сопротивлением 1 Ом, из закона Ома $IR = U$ следует, что показания вольтметра в Вольтах соответствуют значениям силы тока в Амперах, то есть $I (A) = U (V)$. Для измерения мощности генерации используется схема, встроенная в блок питания лазера. При этом численное значение мощности генерации в миллиВаттах ($1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$) выводится на цифровой индикатор, расположенный на лицевой панели блока питания лазера.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Вставить отвертку в шлиц переменного резистора. Вращая отвертку, получить нулевое значение на вольтметре 1.
2. Вращая отвертку ПО часовой стрелке снять зависимость напряжения на лазерном диоде и мощности генерации от тока накачки. Значения напряжения на лазерном диоде считываются с вольтметра 1. Значения тока определяются с учетом Замечания (см. выше). Составить таблицу и занести в нее измеренные значения.

№ пп	I , мА	U , В	P , мВт
1			
2			
...			

Рекомендуется изменять значение силы тока до 70 мА через 10 мА, свыше 70 мА - через 5 мА.

3. По результатам измерений построить график зависимости мощности генерации от тока накачки (ватт-амперная характеристика - ВтАХ).
4. По ВтАХ определить пороговый ток генерации. Для этого необходимо графически аппроксимировать ВтАХ двумя пересекающимися прямыми (см. Приложение, Рис.9). Значение тока в точке пересечения этих прямых и есть пороговый ток генерации.
5. Определить к.п.д. лазера по формуле:

$$\eta = \frac{P_{\text{ГЕН}}}{U \cdot I},$$

где $P_{\text{ген}}$ - мощность генерации лазера в Ваттах,
 U - напряжение на лазерном диоде в Вольтах,
 I - ток через лазерный диод в Амперах.

Значения U, I, P выбрать по указанию преподавателя.

6. Определить дифференциальный квантовый выход (см. Приложение, ф-ла 3).

ПРИЛОЖЕНИЕ.

1. Основные сведения из квантовой электроники и лазерной техники.

Квантовой электроникой называется область физики, охватывающая исследования методов усиления, генерации и преобразования частоты электромагнитных колебаний и волн, основанных на вынужденном излучении или нелинейном взаимодействии излучения с веществом.

Элементарными источниками света являются атомы (молекулы), в которых переход электронов из высшего энергетического состояния E_2 в низшее состояние E_1 сопровождается излучением кванта энергии (фотона) $h\nu = E_2 - E_1$, где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка. Если переход электрона из энергетического состояния E_2 в состояние E_1 с испусканием фотона происходит самопроизвольно без каких-либо внешних воздействий, то такой процесс называют **спонтанным** излучением (Рис.1 а). Чем больше вероятность спонтанных переходов, тем меньше среднее время жизни атома в возбужденном состоянии. Так как переходы отдельных электронов взаимно не связаны, то спонтанное излучение некогерентно (т.е. частоты излучаемых фотонов могут быть различны, различны же и их направления распространения и фазы), что характерно, например, для теплового излучения лампы накаливания.

Переход атома (молекулы) в высшее возбужденное энергетическое состояние с поглощением кванта энергии (фотона) (Рис.1 б) может быть обусловлен тепловым движением атомов (молекул), электрическим током, электрическим и магнитным полями, внешним излучением и др., причем, энергия поглощенного кванта соответствует разности энергий между конечным и начальным энергетическими состояниями.

В 1917 г. А. Эйнштейн для объяснения наблюдавшегося на опыте термодинамического равновесия между веществом и испускаемым и поглощаемым им излучением постулировал, что помимо поглощения и спонтанного излучения должен существовать третий, качественно иной тип взаимодействия. Если на атом, находящийся в возбужденном состоянии E_2 , действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию $h\nu = E_2 - E_1$, то возникает **вынужденный (индуцированный) переход** (Рис.1 в) в состояние E_1 с излучением фотона той же энергии $h\nu = E_2 - E_1$. При подобном переходе происходит излучение атомом *вторичного* фотона *дополнительно* к *первичному* фотону, под действием которого произошел переход. Причем, вторичный фотон имеет такую же энергию, направление распространения, фазу и поляризацию, что и первичный фотон. Таким образом, вместо одного исходного фотона теперь имеются уже два абсолютно идентичных фотона, которые, двигаясь в одном направлении и, встречая другие возбужденные атомы, стимулируют дальнейшие вынужденные переходы. Это может явиться началом лавинообразного увеличения числа таких фотонов, движущихся в одном направлении и образующих узконаправленный когерентный световой пучок (**квантовое усиление излучения**). Однако наряду с вынужденным излучением происходит и поглощение. Поэтому для усиления падающего излучения необходимо, чтобы число актов вынужденного излучения фотонов превышало число актов поглощения фотонов. В термодинамическом равновесии поглощение падающего излучения преобладает над вынужденным, т.е. падающее излучение при прохождении через вещество будет ослабляться.

Чтобы среда усиливала падающее на нее излучение, необходимо создать такие условия, при которых множество возбужденных атомов будет превышать множество невозбужденных. Такая среда называется **средой с инверсной населенностью уровней энергии**, или **активной средой**. Для создания активной среды необходимо подведение каким-либо образом энергии извне. Данный процесс называется **накачкой**.

Впервые на возможность получения сред, в которых свет может усиливаться за счет вынужденного излучения, указал в 1940 г. В.А. Фабрикант. А в 1951 г. В.А. Фабрикант и его сотрудники М.М Вудынский и Ф.А. Бутаева разработали и зарегистрировали способ усиления электромагнитного излучения с помощью сред с инверсной населенностью.

Датой рождения квантовой электроники и лазерной техники является 1954 г. В этом году Н.Г. Басов, А.М. Прохоров (СССР) и независимо Ч. Таунс (США)¹ с сотрудниками создали **первый квантовый молекулярный генератор** на аммиаке - **мазер** (аббревиатура английского названия Microwave Amplification by Stimulated



Рис.1

¹ В 1964 г. Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

Emission of Radiation – усиление микроволн с помощью вынужденного излучения), в котором впервые было осуществлено инверсное состояние среды.

Следующим шагом стало создание **оптических квантовых генераторов (ОКГ) – лазеров** (аббревиатура английского названия Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света с помощью вынужденного излучения). Лазеры излучают электромагнитные волны в инфракрасной, видимой и ближней ультрафиолетовой областях (т.е. в оптическом диапазоне).

Лазерное излучение обладает следующими свойствами:

- *Временная и пространственная когерентность.* Время когерентности составляет $\sim 10^{-3}$ с, что соответствует длине когерентности порядка 10^5 м.
- *Строгая монохроматичность* ($\Delta\lambda < 10^{-11}$ м).
- *Большая спектральная плотность мощности излучения.* Например, маломощный гелий-неоновый лазер в спектральном интервале $\Delta\nu = 10^3$ Гц дает плотность мощности излучения порядка 10^{-3} Вт/см². На такой же интервал в максимуме излучения Солнца ($\lambda = 0,5$ мкм) приходится 10^{-7} Вт/см², т.е. в 10 тысяч раз меньше.
- *Очень малое угловое расхождение в пучке.* Например, при использовании специальной фокусировки луч лазера, направленный с Земли, дал бы на поверхности Луны световое пятно диаметром примерно 3 км (луч прожектора осветил бы поверхность диаметром примерно 40 000 км).

2. Краткие характеристики основных типов лазеров.

Лазер обязательно имеет три основных компонента (см. Рис.2):

- 1) *активную среду*, в которой создаются состояния с инверсией населенностей;
- 2) *систему накачки* – устройство для создания инверсии в активной среде (на Рис.2 не указано);
- 3) *оптический резонатор* – система отражающих, преломляющих, фокусирующих, дисперсионных и других оптических элементов, в пространстве между которыми могут возбуждаться и формироваться определенные типы колебаний электромагнитного поля оптического диапазона. Обычно активная среда определяет название лазера.



Рис.2

Важнейшими из существующих типов лазеров (по типу активной среды) являются:

- **твердотельные** – активной средой являются кристаллические или аморфные вещества, содержащие ионы переходных металлов, редкоземельных элементов или актинидов, энергетические уровни которых используются для создания инверсной населенности. *Накачка:* оптическая. *Применение:* лазерная спектроскопия, нелинейная оптика, лазерная технология (сварка, закалка, упрочнение поверхности);
- **газовые** – активной средой являются различные газы, их смеси и пары. *Накачка:* электрический разряд. *Применение:* спектроскопия, стандарты частоты и длины, настройка оптических систем, маркшейдерские работы, нелинейная оптика, лазерная химия, медицина, лазерная технология.
- **полупроводниковые** – активной средой являются различные полупроводниковые соединения. *Накачка:* различные способы (см. ниже). *Применение:* спектроскопия, оптические стандарты частоты, оптические линии связи, звуко- и видеосистемы, оптическая обработка информации.

- **жидкостные** – активной средой являются либо растворы органических красителей в воде, этаноле, толуоле, бензине, ацетоне и других растворителях, либо металлоорганические или неорганические жидкости, активированные ионами редкоземельных элементов. *Накачка:* оптическая. *Применение:* в основном спектроскопия; основное достоинство – большой диапазон практически непрерывной перестройки частоты генерируемого излучения от инфракрасного до ультрафиолетового диапазонов.

Более точная классификация учитывает методы накачки – оптические, тепловые, химические, электроионизационные и др., а также режим генерации – непрерывный или импульсный.

Первый лазер был создан в 1960 г. Т. Мейманом. Это был **твердотельный лазер** на основе кристаллов рубина – оксида алюминия Al_2O_3 с примесью ионов хрома Cr^{3+} , замещающих в решетке атомы алюминия. Новый источник света генерировал мощные импульсы монохроматического красного излучения с длиной волны $\lambda = 0,694$ мкм. Активной средой в этом лазере является рубиновый стержень, в качестве системы накачки используется спиральная лампа вспышка, оптический резонатор создается двумя плоскопараллельными зеркалами (плоский резонатор, или резонатор Фабри-Перо).

Рубиновый лазер работает по *трехуровневой схеме* (см. Рис.3).

Батарея конденсаторов разряжается через лампу-вспышку, излучение которой возбуждает ионы хрома на третий и более высокие уровни. Время жизни ионов на этих уровнях мало (велика вероятность спонтанного перехода) и они, теряя часть энергии, накапливаются на втором метастабильном уровне, на которых время жизни на четыре порядка больше, чем на третьем уровне. Создается инверсная населенность второго и первого (основного) уровней, т.е. на втором уровне находится больше ионов, чем на первом. Каждый фотон, появившийся в результате спонтанного перехода, может инициировать в активной среде множество вынужденных переходов со второго на первый уровень, в результате чего появляется лавина вторичных фотонов, являющихся копиями первичных. Таким образом и зарождается лазерная генерация. Однако спонтанные переходы носят случайный характер, и спонтанно рождающиеся фотоны испускаются в разных направлениях, соответственно и лавины вторичных фотонов. Благодаря двум плоскопараллельным зеркалам излучение, распространяющееся перпендикулярно к их поверхности, многократно проходит через усиливающую среду – рубиновый стержень – и формирует импульс генерации. Те же фотоны, которые движутся под углами к оси кристалла, покидают активную среду и в формировании импульса генерации не участвуют.

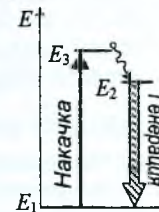


Рис.3

В 1961 г. А. Джаваном, У. Беннетом и Д. Гарриотом был создан **первый газовый** (гелий-неоновый) лазер, работающий в непрерывном режиме. Активной средой в нем является смесь атомов гелия и неона при низком давлении. Инверсная населенность уровней осуществляется электрическим разрядом, возбуждаемым в газах. В гелий-неоновом лазере накачка происходит в два этапа: гелий служит носителем энергии возбуждения, а неон дает лазерное излучение. Электроны, образующиеся в разряде, при столкновениях возбуждают атомы гелия, которые переходят на третий уровень. В свою очередь возбужденные атомы гелия сталкиваются с атомами неона, в результате чего они возбуждаются на третий уровень.

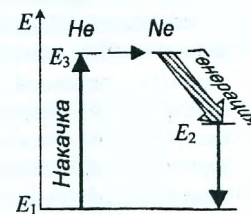


Рис.4

В свою очередь возбужденные атомы гелия сталкиваются с атомами неона, в результате чего они возбуждаются на третий уровень.

ждаются и переходят на один из верхних уровней неона, расположенный вблизи соответствующего уровня гелия. Переход атома неона с верхнего третьего уровня на второй уровень приводит к лазерному излучению с длиной волны $\lambda = 0,633$ мкм (Рис.4).

Еще до появления первого лазера на рубине Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Ю.М. Попов и О.Н. Крохин в 1959–1960 гг. теоретически обосновали возможность получения вынужденного излучения в полупроводниках.

Первый полупроводниковый инжекционный лазер был создан Р. Холлом и У. Думке (США) в 1962 г., он генерировал инфракрасное излучение при инжекции тока через *p-n*-переход в арсениде галлия.

Активными частицами в полупроводниковых лазерах (лазерных диодах) в отличие от всех остальных типов лазеров служат избыточные (неравновесные) электроны проводимости и дырки, т.е. свободные носители заряда, которые могут инжектироваться (вводиться), диффундировать и дрейфовать в активной среде. В полупроводниковых лазерах активным элементом является полупроводниковый монокристалл, возбуждаемый либо инжекцией носителей в область *p-n*-перехода (*инжекционные лазеры*), либо пучком электронов высокой энергии (*полупроводниковый лазер с электронной накачкой*), либо электрическим разрядом (*стримерные лазеры*).

Наибольшее распространение в настоящее время получили инжекционные лазеры. В инжекционных лазерах электрическая энергия непосредственно преобразуется в энергию лазерного излучения.

Инжекционный лазер (Рис.5) представляет собой полупроводниковый диод, зеркальные боковые грани которого образуют оптический резонатор, типичные размеры $250 \times 250 \times 100$ мкм. Активной средой является тонкая прослойка полупроводника, примыкающая к инжектирующему контакту, в которой накапливаются избыточные носители заряда обоих знаков. Толщина активного слоя инжекционного лазера обычно $1-20$ мкм.

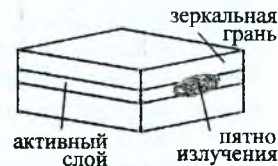
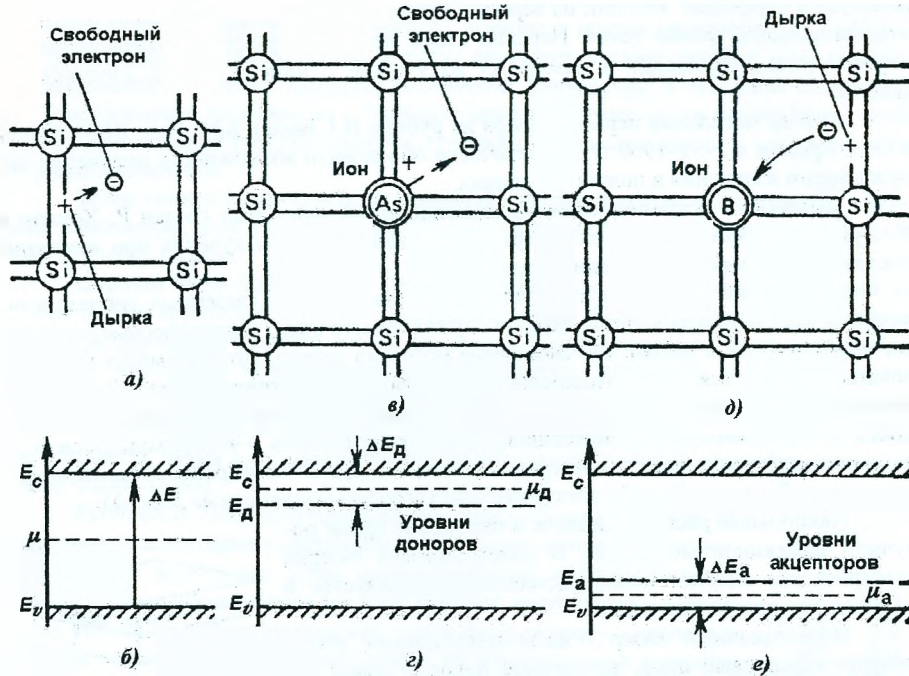


Рис.5

3. Физические принципы работы инжекционных лазеров.

Полупроводники представляют собой кристаллические материалы, т.е. вещества с упорядоченной периодической структурой. Это означает, что атомы, из которых образован кристалл, располагаются в строго определенных местах кристалла, в так называемых узлах кристаллической решетки, на совершенно точно определенных расстояниях друг от друга. При этом электроны соседних атомов вступают в химические, или ковалентные, связи. На Рис.6(а) на примере кремния условно показаны двойными линиями ковалентные связи между соседними атомами. В результате, в отличие от идеальных атомов и молекул, полупроводниковые кристаллы обладают не узкими энергетическими уровнями, а широкими полосами – **зонами** энергетических состояний электронов. Разрешенные зоны отделены одна от другой запрещенными зонами (Рис.6(б)). При низких температурах и отсутствии внешних воздействий электроны полностью заполняют определенное число разрешенных зон. Верхняя заполненная электронами зона называется **валентной зоной** (*v*-зона). Она отделена зоной запрещенных энергий, называемой **запрещенной зоной**, от последующей более высоколежащей **зоны проводимости** (*c*-зоны) (см. Рис.6(а)). Ширина запрещенной зоны $\Delta E = E_c - E_v$, где E_c – энергия дна зоны проводимости, E_v – энергия потолка валентной зоны.



В полупроводнике, подвергнутом нагреву, облучению или пропусканию тока, электроны приобретают дополнительную энергию, и, следовательно, способность преодолевать запрещенную зону и переходить в более высоколежащую зону проводимости. В результате этого образуются пары носителей заряда: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне (дырками называются вакантные места в системе валентных связей в кристалле, откуда ушли электроны (Рис.6(a,b)). Электроны в зоне проводимости являются слабо связанными с конкретным атомом, и могут легко перемещаться по кристаллу, аналогично ведут себя и дырки, что приводит к возникновению **электронно-дырочной проводимости**. Возможны и обратные переходы электронов возбужденного атома на более низкие энергетические уровни: из зоны проводимости в валентную зону. В результате такого перехода пары электрон-дырка **рекомбинируют**, т.е. при заполнении электронами пустых мест (дырок) в валентной зоне электрон и дырка исчезают, выделяя избыточную энергию, полученную электронами извне в процессе возбуждения атома.

В естественных условиях при отсутствии каких-либо внешних воздействий на полупроводник электронно-дырочные пары возникают и рекомбинируют в результате теплового движения и спонтанного испускания фотонов, причем в полупроводнике устанавливается тепловое равновесие электронов и дырок. Оно характеризуется некоторым равновесным количеством электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Вероятность заполнения электроном любого уровня с энергией E при любой температуре T как в валентной зоне, так и в зоне проводимости описывается функцией

ей Ферми–Дирака $F(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-\mu}{kT}}}$, где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

μ – уровень Ферми. **Уровень Ферми** обладает следующими основными свойствами:

- с уровнем Ферми совпадает энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна половине;
- уровень Ферми представляет собой химический потенциал электронов данной системы;
- уровень Ферми определяется из условия, что независимо от распределения по уровням полное число электронов должно остаться неизменным, т.е. полупроводник в целом должен быть нейтральным.

Можно дать следующую физическую интерпретацию уровня Ферми: это уровень, определяющий среднюю энергию электронов (или носителей заряда вообще), могущих принять участие в проводимости.

Если полупроводник идеально химически чист и имеет идеально правильную кристаллическую решетку, он называется беспримесным, или **собственным**. Его проводимость называют **собственной проводимостью**. Для возникновения собственной проводимости чистого полупроводника необходимо сообщить электронам энергию, равную, по крайней мере, ширине запрещенной зоны ΔE , и она называется **энергией активации собственной проводимости**. В собственных полупроводниках уровень Ферми располагается посередине запрещенной зоны (см. Рис.6(б)).

Введение примесных атомов в кристалл (иначе этот процесс называют **легированием**) вызывает появление дополнительных уровней в запрещенной зоне. Различают два сорта примесей: **доноры** и **акцепторы**.

Доноры способны отдавать "лишние" электроны в зону проводимости (например, атом пятивалентного мышьяка в кристалле четырехвалентного кремния (см. Рис.6(в)). Энергия "лишних" примесных электронов несколько меньше, чем энергия, соответствующая нижней границе зоны проводимости полупроводника. Поэтому энергетические уровни E_d примесных электронов располагаются вблизи дна зоны проводимости и называются донорными. Для перевода электронов с донорного уровня в зону проводимости нужна незначительная энергия ΔE_d , активации **электронной проводимости**, и уровень Ферми для электронов μ , располагается между донорным уровнем и дном зоны проводимости (Рис.6(з)). Полупроводники с донорной примесью называются **полупроводниками n-типа**.

Акцепторами называются примеси, которые захватывают электроны, создавая дырки в валентной зоне (например, трехвалентный атом индия в кристалле четырехвалентного кремния (см. Рис.6(д)). Акцепторные уровни E_a расположены вблизи потолка валентной зоны. Электроны, расположенные у потолка валентной зоны, легко могут перейти на акцепторные уровни, а в валентной зоне появятся "вакантные" электронные уровни, которые будут проявлять себя как "положительные" дырки. Энергия ΔE_a , необходимая для перевода электрона на акцепторный уровень, называется энергией активации **дырочной проводимости**, а уровень Ферми для дырок μ_d располагается между акцепторным уровнем и потолком валентной зоны (Рис.6(е)). Полупроводники с донорной примесью называются **полупроводниками p-типа**.

В состоянии теплового равновесия число электронов в валентной зоне во много раз больше, чем в зоне проводимости. Поэтому при освещении полупроводника поглощение света преобладает над усилением. Для усиления света необходимо создать особые условия, при которых концентрация электронов N_c вблизи дна зоны проводимости E_c была бы больше их концентрации N_v вблизи потолка валентной зоны E_v , т.е. $N_c > N_v$. В этих условиях число актов спонтанной и вынужденной рекомбинации будет преобладать над числом актов поглощения и произойдет усиление света. Условие $N_c > N_v$ выполняется при наступлении в полупроводнике так называемого **вырождения**, т.е. такого состояния, при котором все уровни в нижней части зоны проводимости заняты электронами или в верхней части валентной зоны – дырками. Вырожденный полупроводник можно получить путем увеличения концентрации легирующей примеси (доноров или акцепторов). В этом случае, из-за взаимодействия примесных атомов, при достаточной их концентрации, локальные уровни атомов примеси расщепляются и образуют примесную зону, которая при достаточной ее ширине может перекрываться с зоной проводимости (валентной зоной). При этом, уровень Ферми оказывается в зоне проводимости (в валентной зоне) выше дна зоны проводимости E_c (ниже потолка валентной зоны E_v).

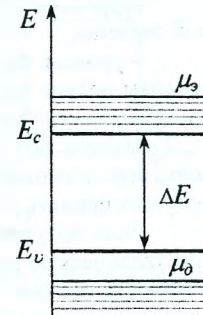


Рис.7

Если в полупроводнике одновременно вырождены электроны и дырки (Рис.7), то расстояние между уровнями Ферми для электронов μ_e и для дырок μ_h больше, чем ширина запрещенной зоны, т.е.

$$\mu_e - \mu_h > \Delta E. \quad (1)$$

Это энергетическое состояние, необходимое для работы полупроводникового лазера, принято называть **инверсией населенностей уровней**.

В чистых беспримесных полупроводниках получить одновременное вырождение электронов и дырок практически невозможно. Если в одну часть кристалла ввести донорную примесь, а в другую – акцепторную, то на границе раздела областей с разными типами проводимости образуется электронно-дырочный переход, или **p-n-переход**, который характеризуется потенциальным барьером (Рис.8(a)), препятствующим диффузионному движению основных носителей заряда в p- и n-областях. Высота потенциального барьера зависит от степени вырождения p- и n-областей. В условиях равновесия уровни Ферми в p- и n-областях p-n-перехода совпадают.

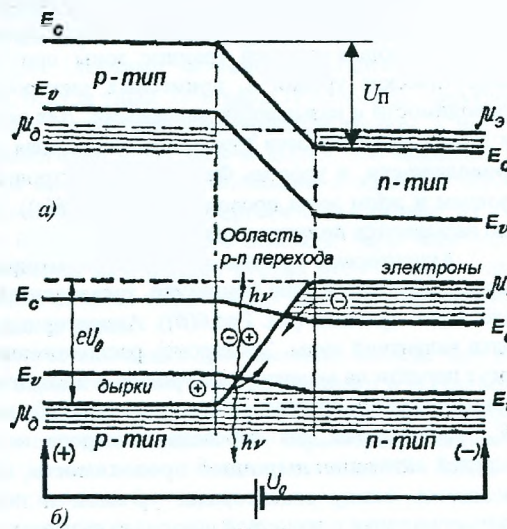


Рис.8

Если приложить к переходу внешнюю прямую разность потенциалов (т.е. положительный электрод (“плюс”) источника подключить к p-, а отрицательный электрод (“минус”) к n-областям), то потенциальный барьер исчезнет, и уровни Ферми в p- и n-областях совпадут.

трод ("минус") к n -области), сравнимую с контактной разностью потенциалов, то это приведет к исчезновению потенциального барьера и к созданию вблизи границы раздела области, в которой реализуется условие инверсии населенностей (1) (Рис. 8(б)).

Резкое снижение потенциального барьера приводит к интенсивной **инжекции**, т.е. "впрыскиванию" в p - n -переход электронов из n -области и дырок из p -области полупроводника. Потоки этих носителей, встречаясь в p - n -переходе, рекомбинируют, излучая при этом фотоны (кванты). Чем выше прикладываемая разность потенциалов, тем больше **инжекционный ток** I , текущий через переход, и тем более интенсивной становится рекомбинация. Минимальная сила тока, при которой интенсивность рекомбинационного излучения становится сравнимой с интенсивностью поглощенного света в p - n -переходе, называется **пороговым током** $I_{\text{пор}}$. При токе, большем порогового, p - n -переход становится активной средой, которая усиливает свет, распространяющийся в плоскости p - n -перехода. В таком состоянии в p - n -переходе может происходить процесс вынужденного излучения, энергия квантов которого близка к ширине запрещенной зоны. Иначе говоря, под действием распространяющихся в p - n -переходе квантов света, которые появились в результате спонтанного перехода, возникают новые кванты, тождественные по энергии и направлению распространения исходным. Генерация света в p - n -переходе наступает тогда, когда оптическое усиление компенсирует потери энергии в активной среде. В этом случае p - n -переход превращается в квантовый генератор, или лазер. Поскольку в основе работы такого источника света лежит инжекция носителей в p - n -переход, то такой квантовый генератор получил название **полупроводникового инжекционного лазера**.

Для улучшения условий генерации света вводят положительную обратную связь, задача которой состоит в том, чтобы возвращать часть полученного излучения обратно в активную среду. В полупроводниковых лазерах обратная связь осуществляется за счет отражения от граней самого кристалла, перпендикулярных плоскости p - n -перехода и параллельных между собой. Часть квантов света, отраженная от выходной грани и возвращенная назад в кристалл, проходя через него, вызывает вынужденную рекомбинацию, при которой испускаются дополнительные кванты света, идентичные отраженным.

Примерный вид инжекционного полупроводникового лазера показан на Рис. 5. На Рис.9 приведена типичная ватт-амперная характеристика инжекционного лазера, аппроксимированная двумя прямыми A и B . Прямая A соответствует ватт-амперной характеристике инжекционного лазера при спонтанном излучении, прямая B – ватт-амперная характеристика инжекционного лазера в режиме генерации лазерного излучения. Практически значение порогового тока $I = I_{\text{пор}}$ определяется как точка пересечения прямых A и B .

К.п.д. инжекционных полупроводниковых лазеров довольно высокий и составляет 30...40%. К.п.д. определяется по формуле

$$\eta = \frac{P}{IU}, \quad (2)$$

где P – мощность излучения лазера, I – ток инжекции, U – напряжение на лазере.

Еще одной характеристикой инжекционного лазера является дифференциальный квантовый выход, т.е. отношение изменения числа вышедших квантов к изменению числа инжектированных электронов

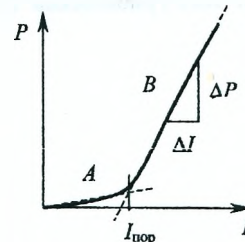


Рис.9

$$\eta_{\text{диф}} = \frac{\Delta P}{(1/q) \Delta I h \nu}, \quad (3)$$

где $q=1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $h=6,63 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $\nu=hc/\lambda$ – частота излучения лазера, λ – длина волны излучения, для лазера, используемого в лабораторной работе $\lambda=840$ нм. ΔP и ΔI определяются по ватт-амперной характеристике инжекционного лазера, как показано на Рис.9.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Свойства лазерного излучения.
2. Основные типы лазеров.
3. Краткие характеристики основных типов лазеров.
4. Применение лазеров.
5. Отличие инжекционного полупроводникового лазера от остальных типов лазеров.
6. Собственная, донорная и акцепторная проводимости полупроводников.
7. Уровень Ферми.
8. Создание инверсной населенности в инжекционном полупроводниковом лазере.
9. Условия генерации излучения в инжекционном полупроводниковом лазере.
10. Принцип работы инжекционного полупроводникового лазера.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. Курс физики, 1989.
2. И.В. Савельев. Курс общей физики, Т. 3, 1988.
3. Д.В. Сивухин. Общий курс физики, Т. 4, Оптика, 1985.
4. Т.И. Трофимова. Курс физики, 1998.
5. И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. Физика для втузов. Электричество и магнетизм. Оптика. Строение вещества, 1994.
6. В.П. Грибковский. Полупроводниковые лазеры, 1988.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители: Гладыщук Анатолий Антонович
Русаков Константин Иванович
Смаль Александр Сергеевич

"ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА"

Методические указания по выполнению лабораторной работы К6

Ответственный за выпуск Русаков К.И.

Редактор Строкач Т.В.

Подписано к печати 08.06.2000 г. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 427. Тираж 120 экз. Бесплатно.
Отпечатано на ризографе Брестского политехнического института,
224017, г. Брест, ул. Московская, 267