

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет»  
Физический факультет**

**Определение спектральной ширины излучения  
полупроводникового лазера**

Учебно-методическое пособие

Составитель: доцент кафедры  
экспериментальной физики, к.ф.-м.н. Щепина  
Л.И.

Иркутск 2014

Печатается по решению учебно-методической комиссии  
Физического факультета Иркутского государственного университета

Рецензент : докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник  
лаборатории ЛКФЛС НИИПФ ИГУ *В.И. Барышников*

**Щепина Л.И.** Определение спектральной ширины излучения  
полупроводникового лазера: учебно-метод. пособие/Л.И. Щепина. - Иркутск  
: Иркут. ун-т, 2014.- с.

*Представлены методические указания для выполнения лабораторной  
работы по теме: Определение спектральной ширины излучения  
полупроводникового лазера. Кратко приведены теоретические основы  
теории лазеров наряду с традиционными вопросами.*

*Рекомендуется для студентов второго курса физических специальностей  
при изучении курса общей физики (оптика), а также студентам  
естественных специальностей ВУЗов.*

**Цель работы** сформировать представление о полупроводниковых лазерах и их роли в прогрессе физических наук. Определить ширину спектра полупроводникового лазера.

**Используемое оборудование** красный лазерный диод U22000, монохроматор МДР-23, ФЭУ-22, самописец EZ-4.

Полупроводники приобретают постоянно возрастающее значение в качестве активных элементов для лазеров, поскольку на них можно построить самые миниатюрные источники света. Путем варьирования состава примесного полупроводника, а также изменяя температуру или давление, можно установить заданную длину волны лазерного перехода. Структуру энергетических зон и населенности в полупроводниках необходимо исследовать на основании статистики Ферми-Дирака. На рис.1 схематически показаны валентная зона и зона проводимости в полупроводнике, а также оптические переходы внутри этих зон и между ними. Лазерным переходом является межзонный переход, тогда как оба типа внутризонных переходов с поглощением создают дополнительные потери, которые служат причиной помех и затрудняют лазерный процесс. Предпочтение отдается полупроводникам с прямым переходом из валентной зоны в зону проводимости, например арсениду галлия (GaAs). Для невзаимодействующих одноэлектронных систем вероятность перехода зависит только от населенности верхнего лазерного уровня. Напротив, в полупроводнике вследствие принципа Паули соответствующий переход может иметь место только при условии, что верхний уровень заселен, а нижний уровень не заселен.

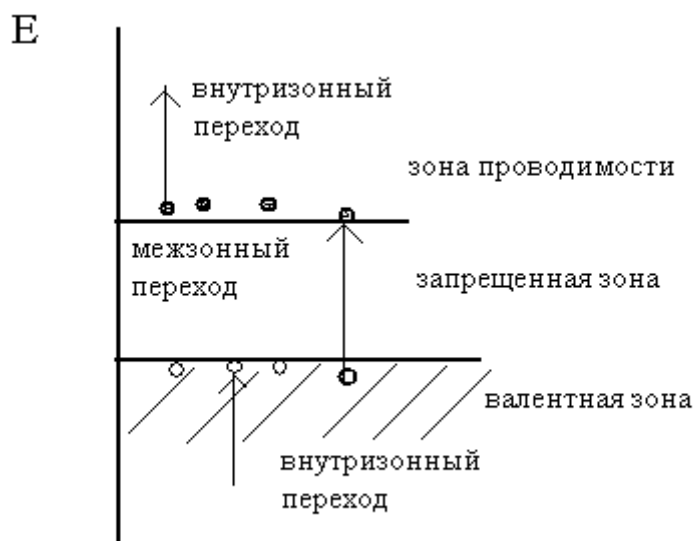


Рис.1. Внутризонные и межзонные переходы в полупроводниках.

Поэтому для скоростей переходов с поглощением ( $dW^a/dt$ ) и с вынужденным испусканием ( $dW^i/dt$ ) между состояниями с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  можно составить уравнения:

$$dW_{12}^a / dt \sim N(E_1) P(E_2) \quad (1)$$

$$dW_{21}^i / dt \sim N(E_2) P(E_1) \quad (2), \text{ где}$$

населенность

$$N(E_1) = D(E_1)f_v(E_1), \quad N(E_2) = D(E_2)f_c(E_2) \text{ и плотность}$$

населенностей для электронов и дырок

$$P(E_1)=D(E_1)[1- f_v(E_1)] \quad P(E_2)=D(E_2)[1- f_c(E_2)]$$

являются зависящими от плотностей состояний  $D(E)$  и вероятностей населенностей для электронов в валентной зоне и зоне проводимости ( $f$ ).

Таким образом, требование

$$dW_{21}^i / dt > dW_{12}^a / dt \quad (3)$$

приводит к неравенству

$$f_c(E_2)[1- f_v(E_1)] > f_v(E_1)[1- f_c(E_2)] \quad (4)$$

откуда следует

$$f_c(E_2) > f_v(E_1) \quad (5)$$

Это означает, что вероятность населенности для более высокой энергии должна превышать вероятность для  $E_1$ . Таково условие усиления света с частотой  $\nu_{21} = (E_2 - E_1)/h$ .

Точно так же, как и в случае изолированных одноэлектронных систем, такое состояние населенностей может достигаться и поддерживаться только путем накачки. Внутри зоны происходят очень эффективные безызлучательные процессы релаксации. Поэтому внутри каждой зоны очень быстро устанавливается квазиравновесное распределение

$$f_{v,c}(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - F)/kT]} \quad (6), \text{ которое}$$

характеризуется квазиуровнем Ферми ( $F$ ). Подстановка этих выражений в условие усиления (5) дает:

$$F_c - F_v > E_2 - E_1 = h\nu \quad (7).$$

Следовательно, процесс накачки должен проводиться таким образом, чтобы расстояние между квазиуровнями Ферми обеих участвующих в переходе зон превышало энергию фотонов излучения, которое требуется усилить. Возбуждение можно осуществить путем облучения светом или пучком электронов или инъекцией носителей заряда (Табл.1).

При оптической накачке полупроводник должен облучаться светом, энергия фотонов которого больше ширины энергетической щели. Такое излучение поглощается в тонком поверхностном слое. В этой области электроны поднимаются из валентной зоны в зону проводимости. Вследствие безызлучательных процессов релаксации электроны собираются на нижнем крае зоны проводимости, тогда как дырки образуются на верхнем крае валентной зоны. При интенсивном облучении можно обеспечить выполнение условия (7), причем для разности  $E_2 - E_1$  следует подставить значение, равное ширине запрещенной зоны.

Таблица 1. Длины волн излучения и способ возбуждения полупроводникового лазера.

Тип лазера	$\lambda$ , мкм	Накачка посредством		
		инъекции	электронного пучка	лазерного пучка
GaAs	0,84	*	*	*
GaSb	1,6	*	*	
InP	0,9	*		
InAs	3,1	*	*	
InSb	5,2	*	*	*
GaP <sub>x</sub> As <sub>1-x</sub>	0,65-0,84	*		
Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As	0,84-3,1	*		
In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	1-3,2	*		
Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,6-1,0	*		
CdS	0,5		*	
CdTe	0,8		*	
PbS	8,5	*		

Вместо света для возбуждения вещества можно применить также бомбардировку быстрыми электронами, энергия которых должна составлять 10-100 кэВ. Более высокие энергии запрещаются во избежание порчи материала. Подобно оптической накачке глубина проникновения электронов очень мала, так что возбужденная зона является очень тонкой (несколько микронов). Быстрые электроны порождают пары электрон-дырка путем ударного возбуждения и при этом теряют свою энергию. Примерно одна треть энергии электронного луча преобразуется в энергию возбуждения.

Возможность миниатюризации и создание интегральных схем – одно из преимуществ полупроводниковых лазеров. Оба эти свойства реализуются лишь при применении третьего метода возбуждения, т.е. при накачке посредством инъекции носителей заряда. С этой целью используется полупроводниковый диод, имеющий p,n- переход. При достаточно высоком легировании высота образующегося на границе перехода потенциального барьера может стать больше ширины запрещенной зоны (Рис.2а); тогда в n области уровень Ферми находится в зоне проводимости, а в p-области – в валентной зоне. При приложении к полупроводниковому диоду напряжения U носители заряда, проходя через p,n – переход, должны преодолеть дополнительный энергетический барьер eU; это означает, что энергии уровней Ферми в обеих областях различаются на величину eU. В зависимости от знака приложенной к переходу разности потенциалов высота потенциального барьера у перехода может уменьшаться или увеличиваться. На рис.2,б показано действие прямого напряжения, вызывающее уменьшение высоты потенциального барьера. Происходит усиленное проникновение электронов и дырок через переходный слой, то есть имеет место инъекция носителей заряда. Предположим, что выравнивание населенностей

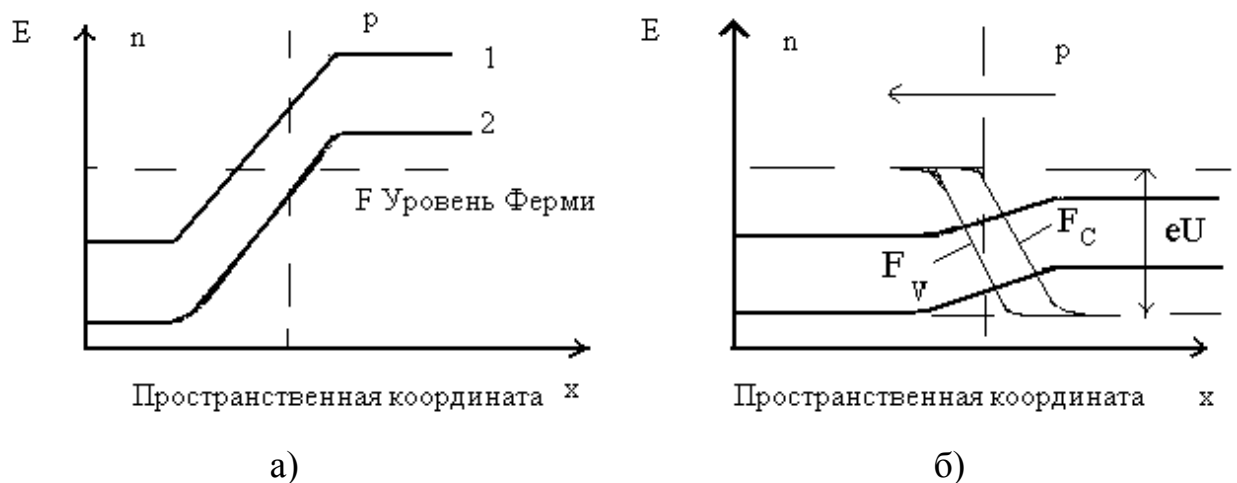


Рис.2 Схематическое представление зон вблизи p,n-перехода в зависимости от пространственной координаты  $x$ : а) - без внешнего напряжения (1- нижний край зоны проводимости, 2- верхний край валентной зоны); б) – при приложении прямого внешнего напряжения  $U$ .

между зоной проводимости и валентной зоной через межзонные процессы релаксации происходит медленнее, чем идет пополнение носителями заряда. Тогда неравновесная электронная населенность в переходном слое должна опять характеризоваться квазиуровнями Ферми для отдельных зон, что и показано на рис.2б. В определенной области пространства разность  $(F_C - F_V)$  больше ширины запрещенной зоны, благодаря чему в некотором слое полупроводника выполняется условие усиления. Толщины этих лазерно активных слоев имеют порядок величины  $10^{-1}$ -  $10^2$  мкм, а плотность тока инжекции равна  $10^6$ - $10^7$  А/м<sup>2</sup>. Для повышения плотности тока в области p,n-перехода чаще всего выбираются специальные формы образцов полупроводников, обеспечивающие ограничение области тока и хороший отвод тепла, связанного с потерями. Тем самым в GaAs- лазерах достигаются пороговые токи для лазерного режима, имеющие порядок  $10^{-1}$  А. Особенно эффективными оказываются так называемые одноямные и многоямные структуры кривых потенциала, в которых создаются определенные области минимумов, имеющие малые размеры. Это достигается путем целенаправленного введения примесей. Электроны и дырки в таких структурах описываются измененными волновыми функциями и обладают новыми временами релаксации. Многие лазерно-активные области такого структурированного полупроводника можно заставить взаимодействовать между собой, и тогда возникающее суммарное излучение будет пространственно когерентным, причем могут достигаться высокие мощности (порядка нескольких Ватт) в непрерывном режиме. От большинства других лазеров полупроводниковый лазер отличается малыми размерами активной среды. Геометрия слоев активных зон создает предпосылки для сильной дифракции излучаемого или усиливаемого света (расходимость луча может достигать значений порядка 1 рад). Благодаря тому, что длина активной области мала, можно работать с предельно короткими резонаторами. В

простейших схемах торцевые поверхности полупроводника с высоким показателем преломления играют роль зеркал резонатора. Малой оптической длине резонатора соответствуют очень большие расстояния между модами  $\delta\nu = c/2L$ ; при  $L=0,5$  мм  $\delta\nu$  принимает значение 300 ГГц. Если необходим внешний резонатор, то торцевые поверхности полупроводника должны быть тщательно просветлены.

Перейдем к рассмотрению спектра генерации полупроводникового лазера, представляющего большой интерес для процесса обучения голографии и для начинающих голографистов. Исторически первыми были разработаны инжекционные полупроводниковые лазеры на основе арсенида галия, рис.3.

Так как его конструкция достаточно проста, рассмотрим принцип работы полупроводникового лазера на его примере. Активным веществом, в котором происходит генерация излучения, является монокристалл арсенида галия, имеющий форму параллелепипеда со сторонами длиной несколько сотен микрон. Две боковые грани делаются параллельными и полируются с высокой степенью точности. За счет большого показателя преломления ( $n = 3,6$ ), на границе кристалл-воздух получается достаточно большой коэффициент отражения (около 35%), что достаточно для получения генерации когерентного излучения без дополнительного напыления отражающих зеркал. Две другие грани кристалла скошены под некоторым углом; через них индуцированное излучение не выходит. Генерация когерентного излучения происходит в p-n переходе, который создается путем диффузии акцепторных примесей (Zn, Cd и др.) в область кристалла, легированную донорными примесями (Te, Se и др.). Толщина активной области в перпендикулярном к p-n переходу направлении составляет около 1 мкм. К сожалению, в такой конструкции полупроводникового лазера пороговая плотность тока накачки оказывается достаточно большой (около 100 тыс. ампер на 1 кв.см.). Поэтому этот лазер мгновенно разрушается при работе в непрерывном режиме при комнатной температуре и требует сильного охлаждения. Лазер стабильно работает при температуре жидкого азота (77 К) или гелия (4,2К).

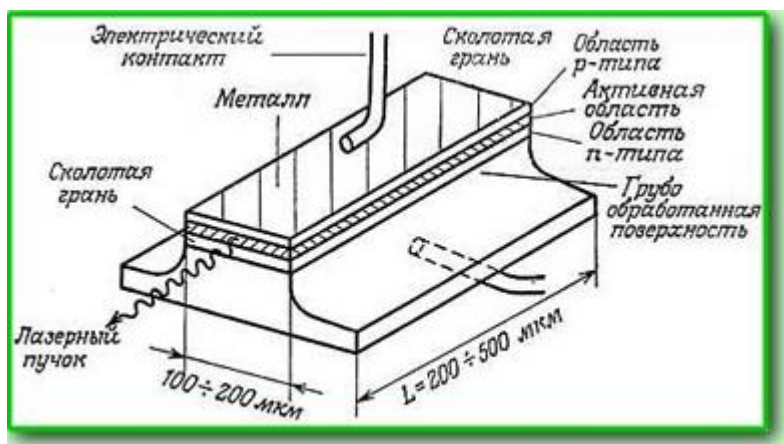


Рис.3. Инжекционный полупроводниковый лазер на основе GaAs.

Современные полупроводниковые лазеры делают на базе двойных гетеропереходов, рис.4. В такой структуре пороговую плотность тока удалось уменьшить на два порядка, до 1000 А/см. кв. При такой плотности тока возможна стабильная работа полупроводникового лазера и при комнатной температуре. Первые образцы лазеров работали в инфракрасном диапазоне (850 нм). При дальнейшем совершенствовании технологии формирования полупроводниковых слоев, появились лазеры как с увеличенной длиной волны (1,3 – 1,6 мкм) для оптоволоконных линий связи, так и с генерацией излучения в видимой области (650 нм). Уже существуют лазеры, излучающие в синей области спектра. Большим преимуществом полупроводниковых лазеров является их высокий КПД (соотношение энергии излучения к электрической энергии накачки), который доходит до 70%. Для газовых лазеров, как для атомарных, так и ионных, КПД не превышает 0,1%.

В связи со спецификой процесса генерации излучения в полупроводниковом лазере, ширина спектра излучения гораздо больше ширины спектра He-Ne лазера, рис.5.

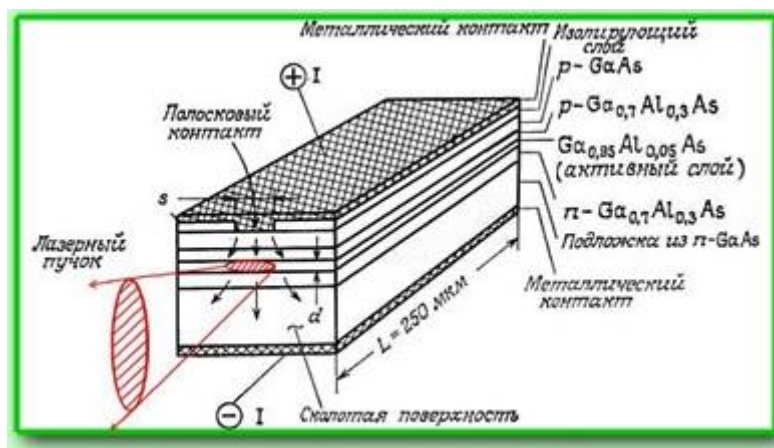


Рис.4 Полупроводниковый лазер на базе двойных гетеропереходов.

Ширина рабочего контура составляет около 4 нм. Число спектральных гармоник может достигать нескольких десятков. Это накладывает серьезное ограничение на длину когерентности лазера. Если воспользоваться формулами, то теоретическая длина когерентности составит всего 0,1 мм. Однако, как показали прямые измерения длины когерентности на интерферометре Майкельсона и запись отражающих голограмм, реальная длина когерентности полупроводниковых лазеров доходит до 4-5 см. Это говорит о том, что реальный спектр генерации полупроводникового лазера не так богат гармониками и имеет не такую большую ширину контура рабочего перехода, как предсказывает теория. Однако, справедливости ради, стоит заметить, что степень когерентности излучения полупроводниковых лазеров сильно меняется как от образца к образцу, так и от режима его работы (величина тока накачки, условия охлаждения и т.д.)



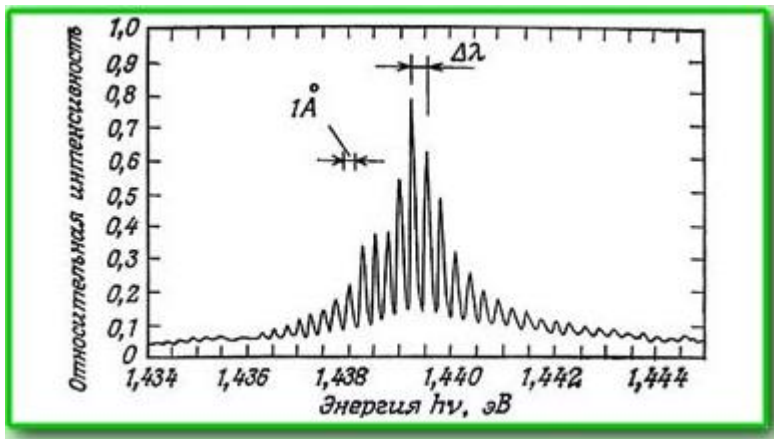


Рис.5 Ширина спектра генерации He-Ne лазера.

### Порядок выполнения работы

1. Включить лазерный диод. Завести излучение в щель спектрального прибора (монохроматор МДР-23).
2. Включить самописец EZ-4.
3. Подать напряжение на ФЭУ. **Внимание! Напряжение не должно превышать 1200 В.**
4. Включить шаговый двигатель монохроматора. Записать спектр излучения полупроводникового диода U22000 в диапазоне 647- 658 нм.
5. Определить спектральную ширину излучения полупроводникового лазера. Сравнить со спектром генерации He-Ne лазера (Рис.5).

### Контрольные вопросы.

1. Внутризонные и межзонные переходы в полупроводниках.
2. Записать условие усиления для полупроводникового лазера.
3. Накачка посредством инжекции носителей заряда. p-n переход.
4. Схематическое представление зон вблизи p,n-перехода в зависимости от пространственной координаты x.
5. Почему лазер на основе GaAs мгновенно разрушается при работе в непрерывном режиме при комнатной температуре и требует сильного охлаждения.
6. В чем преимущества и недостатки полупроводниковых лазеров?

### Рекомендуемая литература

1. Zhores I. Alferov. The double heterostructure: concept and its applications in physics, electronics and technology.// Nobel lecture, December 8.- 2000.- p 413.
2. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры.- Радиофиз. и электрон.- 1988.
3. Херман Й, Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов: Пер с нем.-М.: Мир. 1986.- 386 с.