

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 70

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

### 1. Цель эксперимента

Целью работы является ознакомление с принципом работы полупроводниковых инжекционных лазеров, определение постоянной Планка на основе измерения напряжения включения полупроводникового лазера и длины волны излучаемого им света.

### 2. Краткая теория

#### 2.1. Основные сведения из зонной теории

В кристаллах энергетические уровни валентных электронов атома расщепляются в почти непрерывные, широкие полосы-зоны разрешенных значений энергии. Часть зон будет заполнена электронами, которые при температуре  $T = 0$  К займут состояния с наименьшей энергией. Энергия последнего заполненного уровня называется энергией Ферми  $E_f$ , а соответствующий уровень - *уровнем Ферми*.

Согласно принципу Паули на каждом уровне энергии зоны может быть только два электрона с противоположными спинами. Самая верхняя из всех заполненных зон называется *валентной*. Самая нижняя из всех свободных называется *зоной проводимости*. Между полностью заполненной валентной зоной и зоной проводимости находится *зона запрещенных значений энергии*. Её ширина обозначается  $E_g$  (рис. 1, а).

Для многих полупроводников она составляет менее 2 эВ. Из-за весьма неравномерного распределения энергии по атомам кристалла уже при комнатных температурах становится возможным переход части электронов из валентной зоны в зону проводимости.

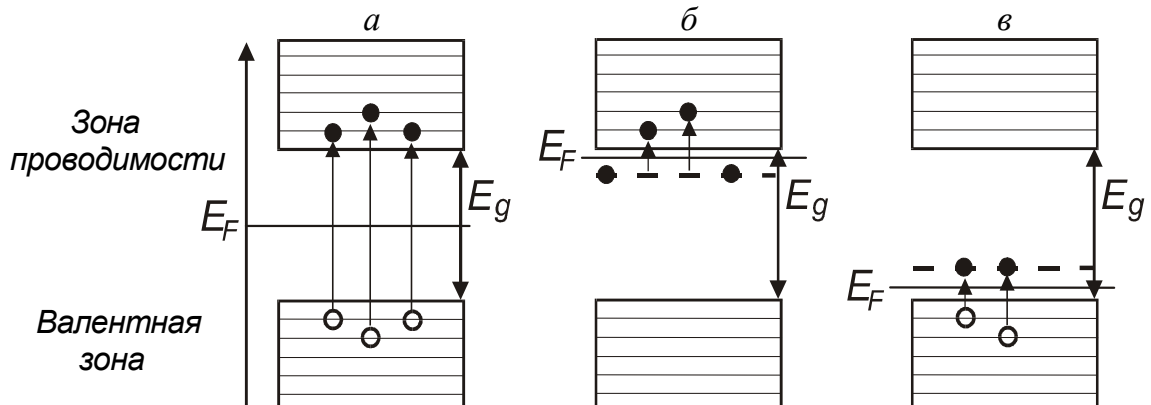


Рис. 1. Зонные схемы чистых и примесных полупроводников

При переходе электрона в верхнюю зону в валентной зоне образуется вакансия (дырка). У чистых кристаллов число электронов в зоне проводимости равно числу дырок, образовавшихся в валентной зоне. Такие кристаллы называются собственными полупроводниками. Уровень Ферми у собственных полупроводников лежит посередине запрещенной зоны.

При наличии примесей, увеличивающих число электронов (донорных) (рис.1, б), часть электронов попадает в зону проводимости, а уровень Ферми смещается к дну зоны проводимости. Такие полупроводники называют полупроводниками *n*-типа или электронными. При наличии примесей, уменьшающих число электронов (акцепторных), электроны не полностью заполняют валентную зону и уровень Ферми перемещается к потолку валентной зоны (рис. 1, в) Незаполненные электронами состояния называются дырками, т. к. формально их поведение можно описывать как поведение положительно заряженных частиц. Такие полупроводники (с акцепторными примесями) называются полупроводниками *p*-типа. Распространение тока в полупроводниках *p*-типа описывается как направленное движение положительно заряженных частиц (дырок) под действием внешнего электрического поля.

Подобно тому, как в изолированном атоме электроны могут совершать переходы между энергетическими уровнями, электроны в кристаллах могут переходить из одной зоны в другую. В примесных полупроводниках, как электронных, так и дырочных, такой переход осуществляется под воздействием электрического поля источника тока. Обратный процесс перехода электрона может сопровождаться излучением кванта света. Излучение света при переходе электрона из состояния с более высокой энергией в состояние с меньшей энергией лежит в основе работы светодиодов и полупроводниковых лазеров.

## 2.2. Инверсия населенности в полупроводниках

Оптическое квантовое усиление в полупроводниках может наблюдаться в том случае, если зона проводимости вблизи её дна заполнена электронами в большей степени, чем валентная зона вблизи её потолка. Преобладание числа переходов с испусканием квантов над переходами с их поглощением обеспечивается тем, что на верхних уровнях находится больше электронов, чем на нижних, тогда как вероятности вынужденных переходов в обоих направлениях одинаковы. Заполнение зон принято описывать с помощью так называемых квазиуровней Ферми, отделяющих состояния с вероятностью заполнения уровней больше 0,5 от состояний с вероятностью меньше 0,5. Если  $E_e$  и  $E_d$  – квазиуровни Ферми для электронов и дырок, то условие

инверсии населенностей относительно переходов с энергией  $h\nu$  (где  $\nu$  – частота излучения) выражается формулой:  $E_e - E_d > h\nu$ .

Для поддержания такого состояния необходима высокая скорость накачки, восполняющей убыль электронно-дырочных пар вследствие излучательных переходов. Применяют следующие методы накачки:

1 – инжекция носителей тока через ***p-n***-переход, гетеропереход или контакт металл – полупроводник (инжекционные лазеры);

2 – накачка пучком быстрых электронов;

3 – оптическая накачка;

4 – накачка путём пробоя в электрическом поле.

Благодаря этим вынужденным переходам, поток излучения нарастает, то есть реализуется оптическое усиление.

Наиболее легко и эффективно инверсия населенности достигается в ***p-n***-переходах за счет инжекции электронов. При включении прямого смещения возникает диффузионный поток электронов через ***p-n***-переход, который стремится поднять квазиуровень Ферми  $E_e$  для электронов в ***p-n***-области до его уровня в ***n***-области. Инжектированные электроны после диффундирования на небольшое расстояние, определяемое диффузионной длиной, рекомбинируют с дырками; в результате возникает стационарное состояние, при котором скорость рекомбинации электронов в точности сбалансирована скоростью их инжекции. Совершенно аналогичны рассуждения и для дырок в валентной зоне. При наличии стационарного состояния положение квазиуровней Ферми для двух типов носителей в области перехода меняется. Основные носители вытягиваются из контакта, чтобы обеспечить условие нейтральности. В настоящее время лазерные диоды в основном изготавливают из GaAs или  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ .

### 2.3. Инжекционные лазеры

Физический механизм работы полупроводниковых лазеров заключается в создании активной области (среды), в которой обеспечивалось бы одновременно присутствие носителей зарядов двух типов: электронов в зоне проводимости, и дырок в валентной зоне с последующей их вынужденной рекомбинацией под действием световой волны.

В отсутствие внешнего напряжения уровни Ферми двух полупроводников, находящихся в контакте, совпадают. В области ***p-n***-перехода энергетические зоны искривляются (рис. 2, а), что препятствует взаимному проникновению электронов и дырок в области с

другим типом проводимости (можно сказать, что в области *p-n*-перехода возникает контактная разность потенциалов).

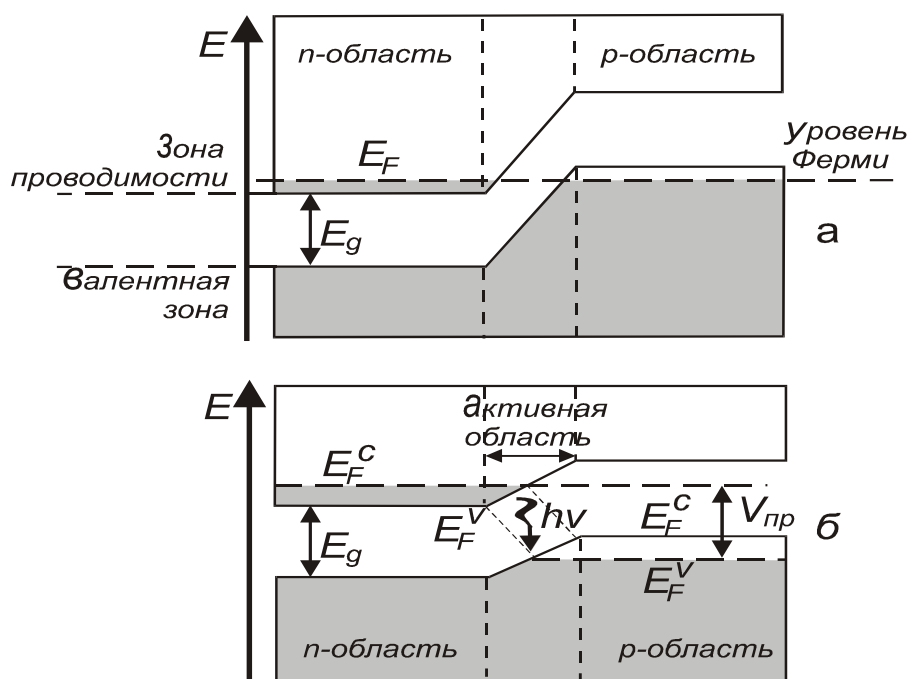


Рис. 2. Зонные схемы, поясняющие возникновение активной области в полупроводниковом кристалле с *p-n*-переходом. Заштрихованы области энергетических зон, заполненные электронами: а - внешнее напряжение к кристаллу не приложено (нулевое смещение); б - к кристаллу приложено напряжение  $V_{пр}$  (прямое смещение)

Для создания активной области к *p-n*-переходу прикладывается внешнее напряжение. Величину этого напряжения выбирают почти соответствующей энергетической ширине запрещенной зоны кристалла  $\Delta E$ , т. е.

$$\Delta E = V_{пр} \cdot e, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона. При наличии внешнего напряжения значения энергии уровней Ферми по обе стороны *p-n*-перехода оказываются неодинаковыми (рис. 2, б).

В области *p-n*-перехода появляется узкая активная область, которая содержит электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Проходящее через эту область световое излучение резонансной длины волны усиливается за счет их рекомбинации.

Создание активной среды в большинстве полупроводниковых лазеров основано на инжекции носителей заряда (электронов и дырок) в область *p-n*-перехода. Поэтому лазеры такого типа называются инжек-

ционными полупроводниковыми лазерами. В первых инжекционных лазерах активная среда создавалась вблизи *p-n*-перехода между двумя областями одного и того же полупроводникового кристалла; *p*- и *n*-области такой структуры отличаются только типом примеси (акцепторная или донорная), которой они легированы. Такой *p-n*-переход называется гомопереходом, а полупроводниковый лазер на основе этого перехода - гомолазером.

Существенным недостатком гомолазеров является то, что толщина  $t$  активного слоя существенно меньше толщины  $d$  области локализации лазерной моды. Так, например, для *p-n*-перехода, приготовленного в кристалле GaAs,  $t = 1$  мкм,  $d = 3$  мкм. Поскольку  $d > t$ , то активный слой взаимодействует только с центральной частью световой волны. Другая ее часть оказывается за пределами этого слоя и не только не усиливается, но, напротив, поглощается. В результате этого пороговый ток гомолазеров недопустимо высок и их практическое использование затруднено.

Радикально улучшить характеристики полупроводниковых лазеров удалось при создании гетеропереходов. Структура гетероперехода (гетероструктура) сложнее, чем структура гомоперехода. Наилучшими характеристиками обладают лазеры на основе двойного гетероперехода, который состоит из  $p_w$ - и  $n_w$ -областей полупроводника с широкой запрещенной зоной (широкозонного полупроводника), между которыми расположен тонкий слой полупроводника с узкой зоной (узкозонный полупроводник) (рис. 3, а).

Активная область в таком переходе совпадает со слоем узкозонного полупроводника. Именно в этой области накапливаются одновременно электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны. Структура гетероперехода обеспечивает достижение более высокой концентрации электронов и дырок в активной области и, следовательно, более высокого коэффициента усиления. Кроме того, такая структура обладает свойствами волновода, т. к. показатель преломления узкозонного полупроводника выше, чем показатель преломления широкозонного. Это обеспечивает ограничение поперечных размеров усиливаемой световой волны (рис. 3, б). Полупроводниковые лазеры на гетеропереходах позволяют осуществить непрерывный режим генерации при температурах до 350 К.

Необходимая для усиления плотность тока в 10 раз ниже чем у лазерах на *p-n*-переходе. Недостаток инжекционных лазеров - большая дифракционная расходимость и относительно широкий спектр генерации по сравнению с газовыми лазерами.

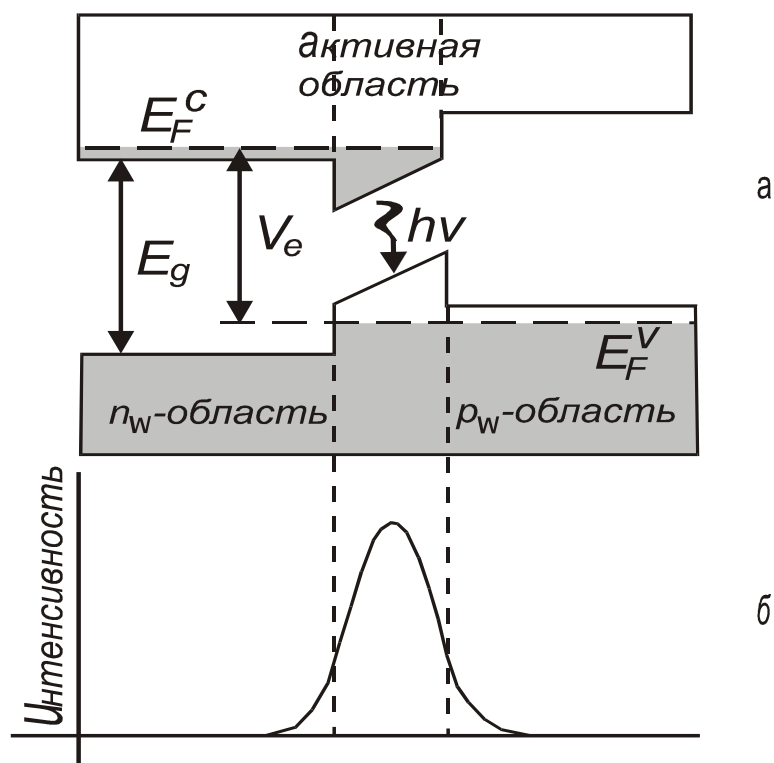


Рис. 3. а - структура энергетических уровней гетероперехода с двойным ограничением во внешнем электрическом поле;  
б - поперечное сечение световой волны

К основным параметрам лазерного диода относятся спектр частот излучения (оптические моды), пороговый ток, выходная мощность излучения и эффективность работы. Когда ток проходит через лазерный диод, то свет генерируется за счет инверсии населенности посредством спонтанного и стимулированного излучений. Вследствие отражения от торцов свет многократно проходит через активную область и преимущественно усиливается стимулированным излучением. Внутри лазерного диода устанавливается стоячая волна с целым числом полувольт между торцевыми поверхностями. Модовое число  $m$  задается числом полувольт:

$$m = 2Ln/L_w ,$$

где  $L$  - расстояние между торцами;  $n$  - показатель преломления;  $L_w$  - длина волны излучения в вакууме. Обычно существует несколько продольных мод, имеющих длины волн вблизи пика спонтанной эмиссии. Модовое разделение для полупроводникового лазера на основе GaAs составляет  $dL_w = 0,3$  нм. Для того чтобы лазер работал в одномодовом режиме, необходимо каким-либо способом подавить нежелательные боковые моды, оставив основную центральную. Спектр излучения

лазерного диода показан на рис. 4. Лазерный диод не сразу начинает излучать при приложении к нему напряжения от внешнего источника.

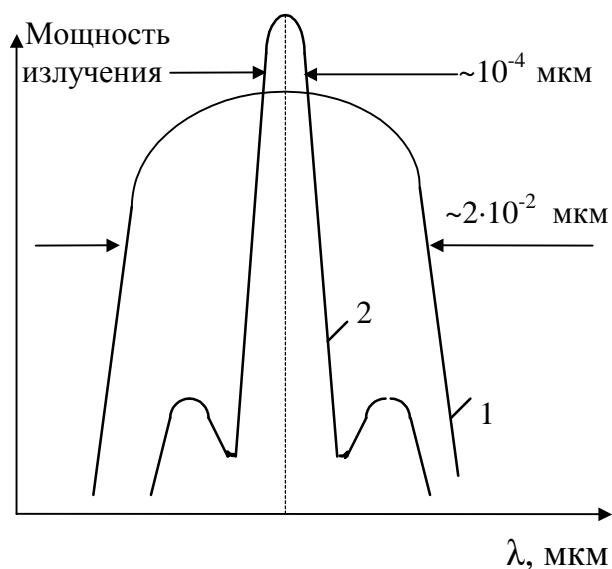


Рис. 4. Модовый состав лазерного излучения

При малом токе имеет место спонтанное излучение с шириной спектра излучения в несколько сотых микрометра. По мере нарастания тока накачки в области *p-n*-перехода создается высокая степень инверсии населенности и излучается больше света. Отдельные фотоны многократно проходят строго в плоскости *p-n*-перехода и перпендикулярно к торцам диода усиливаются. С возрастанием тока накачки испускаемое диодом излучение существенно сужается одновременно по ширине спектра и по пространственной расходимости. Когда возникает индуцированное излучение, интенсивность излучения увеличивается за счет образования большого количества электронно-дырочных пар в единицу времени. Спонтанное излучение подавляется вследствие того, что образовавшиеся первоначально фотоны повторяют себя при прохождении через активную область. Излучение диода, полученное при плотностях тока выше порогового, являются когерентными. При этом форма кривой спектрального распределения резко изменяется от широкой кривой распределения спонтанной эмиссии 1 к кривой с несколькими узкими модами 2 (рис. 3). В заключение отметим, что в разработке и создании полупроводниковых лазеров приняли участие такие российские ученые как Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов и др. За разработку гетероструктур российский ученый Ж. И. Алферов удостоен Нобелевской премии.

## 2.1. Использование лазера для определения постоянной Планка

Для того чтобы электрон мог совершить переход в разрешенное состояние с более высокой энергией, он должен приобрести в электрическом поле энергию, равную ширине запрещенной зоны. Энергия, приобретаемая электроном в электрическом поле, составляет  $eV$ . Энергия фотона  $h\nu$ , излучаемого при обратном переходе электрона в нижнее энергетическое состояние также приблизительно равна ширине запрещенной зоны. Можно записать, что  $h\nu = eV$ , где  $h$  - постоянная Планка;  $\nu = c/\lambda$  - частота света, излучаемого полупроводниковым лазером;  $e$  - заряд электрона;  $V$  - напряжение, приложенное к  $p$ - $n$ -переходу лазера.

Таким образом, для определения постоянной Планка необходимо измерить длину волны излучаемого лазером света и измерить напряжение, при котором  $p$ - $n$ -переход начинает излучать световые кванты.

В предлагаемом эксперименте длина волны излучения определяется с помощью дифракционной решетки с известным числом штрихов ( $N = 50$  штрихов/мм, точное значение периода  $d$  указано на лабораторном стенде). Если падающий луч перпендикулярен поверхности решетки (угол падения равен нулю), то длина волны излучения  $\lambda$ , период решетки  $d$ , угол  $\varphi_n$  и порядок  $n$  дифракции связаны условием максимумов:

$$d \cdot \sin \varphi_n = n \cdot \lambda. \quad (2)$$

## 3. Выполнение работы

### 3.1. Необходимые приборы

- 1 - лабораторный стенд, содержащий дифракционную решетку, полупроводниковый лазер, экран со шкалой и регулирующий резистор;
- 2 - цифровой вольтметр;
- 3 - блок питания 5 В.

### 3.2. Порядок выполнения работы

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.

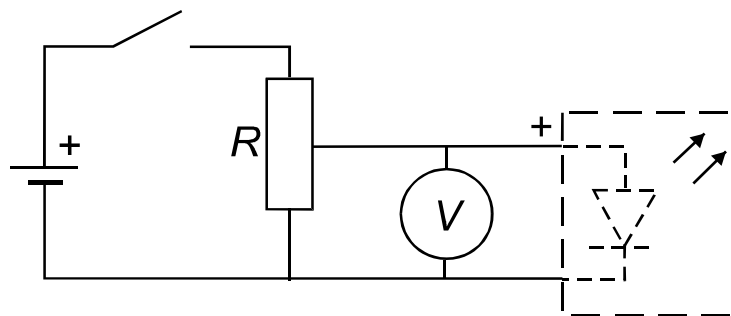


Рис. 5. Электрическая схема экспериментальной установки



Все элементы этой цепи, за исключением вольтметра и блока питания, смонтированы на лабораторном стенде. Напряжение на полупроводниковом лазере регулируется с помощью переменного резистора. Для измерения напряжения используется цифровой вольтметр. Напряжение должно измеряться с точностью 0,0001 В.

Для выполнения работы в первую очередь включите цифровой вольтметр и дайте ему прогреться в течение 5 мин.

Затем включите блок питания, поставив переключатель на нем в положение «ВКЛ», при этом на блоке загорится сигнальный светодиод.

С помощью переменного резистора установите на лазерном диоде максимальное напряжение – 5 В. На экране со шкалой будет наблюдаться дифракционная картина в виде ряда светящихся точек – максимумов разных порядков.

Измерьте расстояние  $a_n$  по шкале экрана, например, между нулевым (самым ярким максимумом – он должен быть расположен внизу шкалы экрана) и третьим, нулевым и пятым, нулевым и седьмым максимумами.

Полученные значения запишите в табл. 1.

Таблица 1

**Расчет длины волны излучения по результатам измерений**

$n$	$a_n$	$\sin \varphi_n$	$\lambda$	$\Delta \lambda$
$d =$		$b =$	$\langle \lambda \rangle =$	$\langle \Delta \lambda \rangle =$

По

измеренным значения  $a_n$  и  $b$  вычислите  $\sin \varphi_n$  по следующему соотношению:

$$\sin \varphi_n = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b^2}}, \quad (3)$$

где  $b$  - расстояние от дифракционной решетки до экрана, указано на стенде. Полученные три значения  $\sin \varphi_n$  запишите в табл. 1.

Используя формулу (2), вычислите три значения длины волны  $\lambda$ , рассчитайте среднее значение  $\langle \lambda \rangle$  и среднее значение  $\langle \Delta \lambda \rangle$ .

Результат запишите в виде:

$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \langle \Delta \lambda \rangle. \quad (4)$$

Для определения постоянной Планка необходимо измерить пороговое напряжение включения лазерного диода. Для этого, вращая ручку переменного резистора (потенциометра), плавно уменьшайте напряжение питания до тех пор, пока пятно **первого** максимума на экране станет едва заметным. Показания вольтметра в этот момент можно считать равным пороговому напряжению включения лазера.

Проделайте измерения порогового напряжения три раза, результаты запишите в табл. 2.

Используя средние значения  $\langle V \rangle$  и  $\langle \lambda \rangle$ , определите постоянную Планка по соотношению:

$$h = \frac{e \cdot \langle V \rangle}{c} \cdot \langle \lambda \rangle, \quad (5)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  
 $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме.

Таблица 2

**Результаты измерений порогового напряжения**

$N$	$V$	$\Delta V$
1		
2		
3		
	$\langle V \rangle =$	$\langle \Delta V \rangle =$

**3.2. Оценка погрешности и окончательный результат**

Постоянная Планка является косвенно определяемой величиной, причем выражение (5) обладает свойством мультипликативности, поэтому удобно сначала вычислить относительную погрешность по соотношению:

$$E_h = \frac{\langle \Delta h \rangle}{\langle h \rangle} = \frac{\langle \Delta V \rangle}{\langle V \rangle} + \frac{\langle \Delta \lambda \rangle}{\langle \lambda \rangle}, \quad (6)$$

а затем определить абсолютную погрешность по формуле:

$$\langle \Delta h \rangle = E_h \cdot \langle h \rangle, \quad (7)$$

считая, что среднее значение  $\langle h \rangle$  получено по соотношению (5).

Окончательный результат запишите в виде:

$$h = \langle h \rangle + \langle \Delta h \rangle, \quad (8)$$

сравните его с табличным значением постоянной Планка и сделайте вывод.  $h_{\text{табл}} = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с (приближенное значение).

### Контрольные вопросы

1. Что называется уровнем Ферми?
2. Какой энергетический уровень считается вырожденным?
3. Что такое инверсная заселенность уровней?
4. Какие методы накачки применяют в полупроводниковых лазерах?
5. Чем характеризуется модовый состав лазерного излучения?
6. Как в работе определяется длина волны излучения лазерного диода?
7. Как устроена экспериментальная установка? Каково назначение ее отдельных узлов и блоков?
8. На каком принципе основан расчет постоянной Планка в работе.
9. Рассчитайте пороговое напряжение включения лазера, если генерируемая им длина волны равна  $\lambda = 0,4$  мкм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Высш. школа, 1994. 541 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. Т.3. М.: Наука, 1989. 304 с.
3. Елисеев П. Г. Инжекционные лазеры на гетеропереходах. «Квантовая электроника», 1972. № 6.
4. Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983. 234 с.
5. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Тарлыков В. А. Основы лазерной техники. М.: Машиностроение, 1990. 276 с.