

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

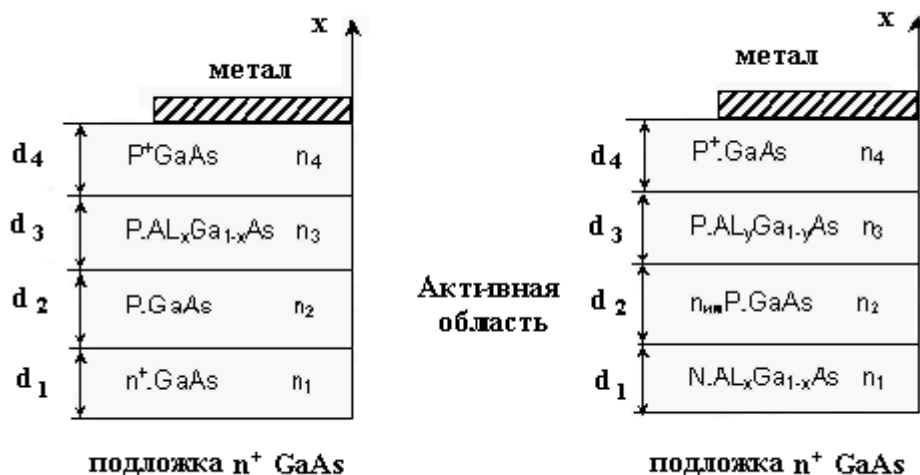
Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники

(СВЧиКР)

Квантовая и оптическая электроника. Квантовые и оптические
устройства

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Руководство к комплексной компьютерной лабораторной работе для
студентов специальности «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем» 090106



Министерство образования и науки РФ

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. СВЧиКР
_____ **С.Н.Шарангович**
« ____ » _____ **2011.**

**Квантовая и оптическая электроника. Квантовые и оптические
устройства**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ЛАЗЕРОВ**

Руководство к комплексной компьютерной лабораторной работе для
студентов специальности «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем» **090106**

Разработчик:
Доц. Каф. СВЧиКР

Л.И. Шангина

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	4
2	Основные вопросы теории	4
2.1	Требования к основным параметрам лазера	4
2.2	Общие сведения о полупроводниковых инжекционных лазерах	5
2.3	Основные параметры инжекционного лазера	6
3	Расчетное задание	13
4	Экспериментальная часть	13
4.1	Вольт - амперная характеристика (ВАХ)	13
4.2	Спектральные параметры	13
4.3	Определение диаграммы направленности и угловой расходимости	15
5	Содержание отчета	16
6	Контрольные вопросы	17
7	Список литературы	18
	Приложения	19
П.1	Обозначения и диапазон параметров для GaAs и GaAlAs/GaAs	19
П.2	Условные обозначения параметров, их пределы и формулы при расчете спектральных характеристик	19
П.3	Условные обозначения и диапазон параметров для определения диаграммы направленности и расходимости	20
П.4	Варианты заданий для лабораторной работы	20

1. ВВЕДЕНИЕ

Ц е л ь ю работы является ознакомление с методикой расчета электрических параметров полупроводникового лазера, а также их экспериментальных определений.

В работе проводится исследование динамических характеристик полупроводниковых лазеров. Проведение лабораторной работы на компьютере позволяет охватить целый комплекс вопросов, порой таких, которые трудно воспроизвести техническими средствами.

Обозначения и диапазон параметров для GaAs и GaAlAs/GaAs приведены в приложении П1, П2, П3.

2. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

2.1. Требования к основным параметрам лазера

В лабораторной работе будут рассматриваться лазеры, используемые в волоконно - оптических линиях связи (ВОЛС).

Излучатель, выбранный для лабораторной работы должен отвечать следующим требованиям:

1. *Рабочая длина волны* оптического излучателя (ОИ) должна, иметь малую дисперсию на длине волны $\lambda=(0,9-2,3)$ мкм.
2. *Ширина спектра излучения* $\Delta\lambda$ или временная когерентность должна быть согласованна с частотными характеристиками оптического волокна (ОВ), максимальной шириной полосы пропускания и скоростью передачи сигнала в волоконно-оптических системах. Ширина $\Delta\lambda$ для лазерных диодов (ЛД) должна быть не более 4-5 нм.
3. *Мощность фонового излучения*, т.е. P_{cp} оптического излучения при отсутствии модулирующего сигнала, должна быть минимальной.
4. *Фокусировка* светового потока (пространственная когерентность) должна быть максимальной и обеспечивать минимум потерь при вводе излучения в ОВ.
5. КПД по мощности должен быть не менее 10%.
6. Модуляция должна иметь полосу частот, обеспечивающую передачу необходимой информации в единицу времени.
7. Изменение λ и $P_{изл}$ при изменении температуры не должны превышать допустимые значения.

2.2. Общие сведения о полупроводниковых инжекционных лазерах

Наиболее распространенными в настоящее время являются *инжекционные* полупроводниковые лазеры, в которых при пропускании тока в прямом направлении через $p-n$ -переход осуществляется инжекция носителей заряда. *Инжекция*-это ввод носителей заряда через $p-n$ -переход в

область, где они являются неосновными. Инжекция позволяет непосредственно перевести электрическую энергию в энергию электронов и дырок.

Введем понятие вырожденного состояния полупроводника. При большой концентрации, легирующих примесей p или n - типа электроны плотно заполняют область, примыкающую ко дну зоны проводимости E_c , а дырки к потолку валентной зоны E_v . Такое состояние полупроводника называется вырожденным и соответствует условию (2.1).

$$E_c - F_v > E_g, \quad (2.1)$$

где E_c – дно зоны проводимости, F_v - квазиуровень Ферми для дырок, $E_g = E_c - E_v$ - ширина запрещенной зоны (E_v - потолок валентной зоны). Непрямые межзонные переходы здесь не будут рассмотрены.

Существуют гомоструктурные и гетероструктурные инжекционные лазеры. В первых для создания p — n -перехода используется одна, а во вторых – несколько полупроводниковых структур.

Гомоструктурные инжекционные лазеры. Как видно из вышеизложенного, одновременное вырождение электронов и дырок, необходимое для создания инверсии, достаточно просто получить в примесном полупроводнике, так как примесные атомы вызывают появление дополнительных уровней в запрещенной зоне полупроводника. При этом атомы, легко отдающие электроны (доноры), образуют уровни вблизи дна зоны проводимости, а атомы, легко воспринимающие электроны (акцепторы), образуют уровни вблизи верхнего края валентной зоны. Полупроводник относят к n - типу, если в нем преобладают донорные примеси, в противном случае к p - типу. При большой концентрации примесей они начинают взаимодействовать между собой, их уровни расширяются в зоны, которые могут частично слиться с зоной проводимости или с валентной зоной и электроны или дырки могут стать вырожденными (см. рис. 2.1). Рассмотрим p — n -переход, в котором p - и n - области вырождены, на нем возникает контактная разность потенциалов

$$(U_{\text{кпп}} = F_c - F_v), \quad (2.2)$$

которая не позволяет больше электронам проникать в p - область, а дыркам в n - область (рис. 2.2). При возникшем таким образом равновесии квазиуровни Ферми в p - и n - областях совмещены. Даже если электроны в n - области и дырки в p - области вырождены, то такой области, где бы они были вырожде-

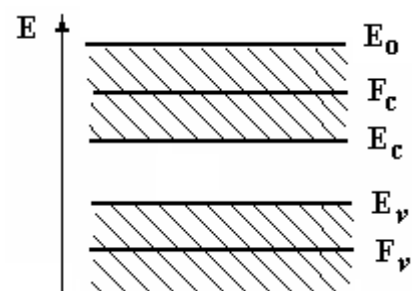


Рис. 2.1. Энергетическая диаграмма вырожденного полупроводника.

ны одновременно, нет (рис. 2.2,а). Ситуация может измениться, если к $p-n$ -переходу приложить такое внешнее напряжение, которое практически снимет потенциальный барьер (рис. 2.2,б). Теперь квазиуровень Ферми для электронов в области $p-n$ -перехода лежит выше дна зоны проводимости, а квазиуровень Ферми для дырок в том же объеме полупроводника лежит ниже потолка валентной зоны. Имеется одновременное (в одной и той же области) вырождение электронов и дырок, т.е. выполняется условие

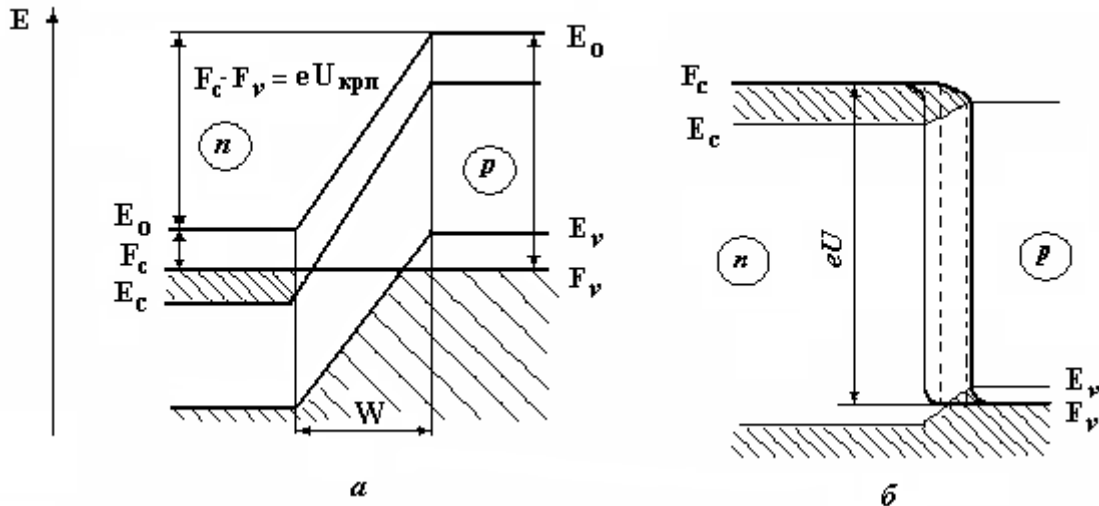


Рис. 2.2. Энергетическая диаграмма $p-n$ -перехода в равновесном состоянии (а) и смещенного в прямом направлении (б); штриховыми линиями показана зона инверсной населенности

инверсии $F_c - F_v > E_g$. Инверсия в $p-n$ -переходе тем выше, чем больший ток протекает через переход.

Для ограничения толщины активного слоя (d_2) $p-n$ -перехода, в которой имеет место высокая степень инверсии населенности, и расширения спектрального состава излучения полупроводниковых лазеров стали использовать гетеропереходы (гетеролазеры).

2.3. Основные параметры инжекционного лазера

Важнейшим параметром, характеризующим полупроводниковый лазер, является величина порогового тока накачки. Пока значение тока через $p-n$ -переход не превышает значение порогового тока, излучение носит спонтанный характер и усиления света не наблюдается. Поэтому необходимо в первую очередь определить характер поведения тока от напряжения, т.е. снять вольт-амперную характеристику (ВАХ).

Рассмотрим влияние смещения на прямой ток. Обычно ток записывается в виде

$$I = I_0 \exp(eV_s/kT), \quad (2.3)$$

где $I_0 = (eD_n n_p / L_n) S$ для площади поперечного сечения S , e - заряд электрона, D_n - коэффициент диффузии неосновных носителей для GaAs $\cong 0^{-2}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$,

n_p - концентрация неосновных носителей, L_n – длина диффузии неосновных носителей, V_s – напряжение насыщения (0,4 ÷ 0,6) В на переходе сечением S. При сильном смещении (V_s больше +0,6 до 2В) таком, что $n = p$ ток записывается уже в таком виде

$$I = I_0 \exp(qV_s/2kT). \quad (2.4)$$

Пороговый ток. Для возникновения индуцированного излучения необходимо, чтобы потери энергии на поглощение компенсировались усилением. Выполнение этого условия характеризуется минимальным значением плотности тока, необходимого для перевода генератора на полупроводниковом диоде в режим когерентного излучения. Причем пороговая плотность тока сильно зависит от температуры. Так, например, при изменении температуры от 4,2 до 125 °К величина плотности энергии возрастает в 25 раз. При высоких температурах изменения плотности порогового тока ($J_{пор}$) пропорциональны T^3 . При комнатной температуре в гомогенных лазерах пороговый ток достигает плотности 10^5 А/ см². При температуре $\rightarrow 0$ К пороговая плотность тока $J_{пор}$ может быть рассчитана по формуле.

$$J_{пор} = \frac{8\pi 10^{-4} e n^2 \Delta E_q^2 \Delta E \cdot d_2 \cdot \gamma}{\eta_{вн.} c^2 h^3} \left(\alpha + \frac{20}{L_{рез}} \lg \frac{1}{\sqrt{r_1 \cdot r_2}} \right). \quad (2.5)$$

Здесь γ - коэффициент, учитывающий температурную зависимость и нелинейность усиления, для GaAs и T=300К $\gamma=9,2$; c-скорость света, ΔE_q – энергия фотона. При увеличении температуры пороговая плотность тока растет, причем эта зависимость не может быть рассчитана

$$J_{пор}(T) = J_{пор}(0) \exp\left(\frac{kT}{\varepsilon_0}\right). \quad (2.6)$$

Спектральные характеристики полупроводниковых лазеров.

Имеется ряд причин, по которым энергия фотона когерентного излучения полупро-водникового лазера отличается от ширины запрещенной зоны (E_q). Более того, его энергия непостоянна даже у лазерных диодов, изготовленных из одного материала, и зависит от легирования, способа изготовления и добротности резонатора. Генерация лазеров носит многочастотный характер за счет неоднородности распределения поля мод вдоль активного элемента. Ширина спектра генерации находится в частотном интервале:

$$\Delta\nu = 0,7 \Delta\nu_{л} \left(\frac{\delta\nu}{\Delta\nu_{л}} \right)^{1/3} (1 - 1/\alpha)^{1/3}, \quad (2.7)$$

где $\Delta\nu_{л}$ -ширина линии люминесценции (примерно $\Delta\nu_{л} = 10$ см⁻¹=300МГц), $\delta\nu$ - расстояние между соседними модами $\delta\nu = c/2L_{рез} \approx 10^{12}$ Гц. по мере повышения уровня накачки $\Delta\nu$ растет, но быстро достигает насыщения, α -потери. Прикидочные значения $\Delta\nu_{предельные} = 0,7 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 15 = 3,15$ Гц.

Для того чтобы установить спектральный интервал, в котором может оказаться излучение одного образца из серии однотипных лазеров (т.е. изготовленных из одного и того же материала одинаковым образом) целесообразно воспользоваться спектральной пороговой характеристикой

$$\hbar\omega = E_0 \ln \frac{j}{j_0} - E_A + kT \cdot \ln \left\{ \frac{E_0}{kT} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{kT}{T_0} \right)^2} - 1 \right] \right\}, \quad \text{откуда} \quad (2.8)$$

$$\lambda(m) := \frac{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot h}{E_0 \cdot \ln(m) - E_A + k \cdot T \cdot \ln \left[\frac{E_0}{k \cdot T} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{k \cdot T}{E_0} \right)^2} - 1 \right] \right]}, \quad (2.8a)$$

где $\hbar\omega$ - энергия фотона на пороге генерации; ω - круговая частота ($\omega = 2\pi\nu$), $m = \ln(j/j_0)$ - превышение пороговой плотности тока накачки, E_A - энергия акцепторного уровня; E_0 - распределение плотности энергии состояний.

При превышении порогового значения плотности тока накачки спектр излучения обогащается новыми типами колебаний, обычно генерация становится многомодовой, если и не на самом пороге генерации, то при весьма незначительном его превышении.

Влияние температуры на изменения частоты излучения. Оно связано, во-первых, с зависимостью показателя преломления от температуры, что приводит к изменению резонансных мод интерферометра Фабри – Перо. Последнее определяется соотношением

$$\frac{d\nu}{dT} = 595 \left[\frac{(n_0 - \bar{n}) \cdot T}{n_0} \right] \frac{\text{мГц}}{^\circ\text{К}}. \quad (2.9)$$

Следовательно, для получения стабильной частоты излучения желательно работать при низкой и постоянной температуре.

Во-вторых, при изменении температуры изменяется ширина запрещенной зоны и область усиления сдвигается по шкале частот, причем этот сдвиг происходит в ту же сторону, но быстрее, чем сдвиг мод резонатора. Это приводит к скачкообразному изменению мод при импульсном режиме работы. Во время импульса температура полупроводника меняется и изменяется частота излучения. Генерация на данной моде будет происходить до тех пор, пока усиление на данной моде будет превосходить потери.

Резонансная частота (ν_r) зависит от отношения токов. Она тем выше, чем больше отношение I_0/I_S , а оно в свою очередь зависит от T .

$$\nu_r = \frac{m}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_n \tau_p} \left(\frac{I_0}{I_S} - 1 \right)}, \quad (2.10)$$

где τ_n , τ_p – времена жизни электронов и дырок по отношению спонтанной рекомбинации, m – логарифм коэффициента усиления по току (типичные значения $m=1,2,3$).

Измерение *длины волны* лазерного излучения проводится с помощью дифракционной решетки. Оптическая схема действия дифракционной решетки приведена на рис. 2.3,а. Плоская волна падает на систему щелей решетки, ширина щелей b , расстояние между щелями (между осями щелей) равно d . Величину d называют постоянной решетки. Из чертежа видно, что постоянная решетки равна сумме ширины щели b и непрозрачной части c . Будем считать, что $d=2b$, полагая $b=c$. Число щелей N решетки, ее ширина D , постоянная решетки d , связаны простым соотношением: $D=bN$.

Монохроматичный лазерный пучок падает на решетку. Проходя через каждую из щелей, свет испытывает дифракцию, вследствие чего каждая щель

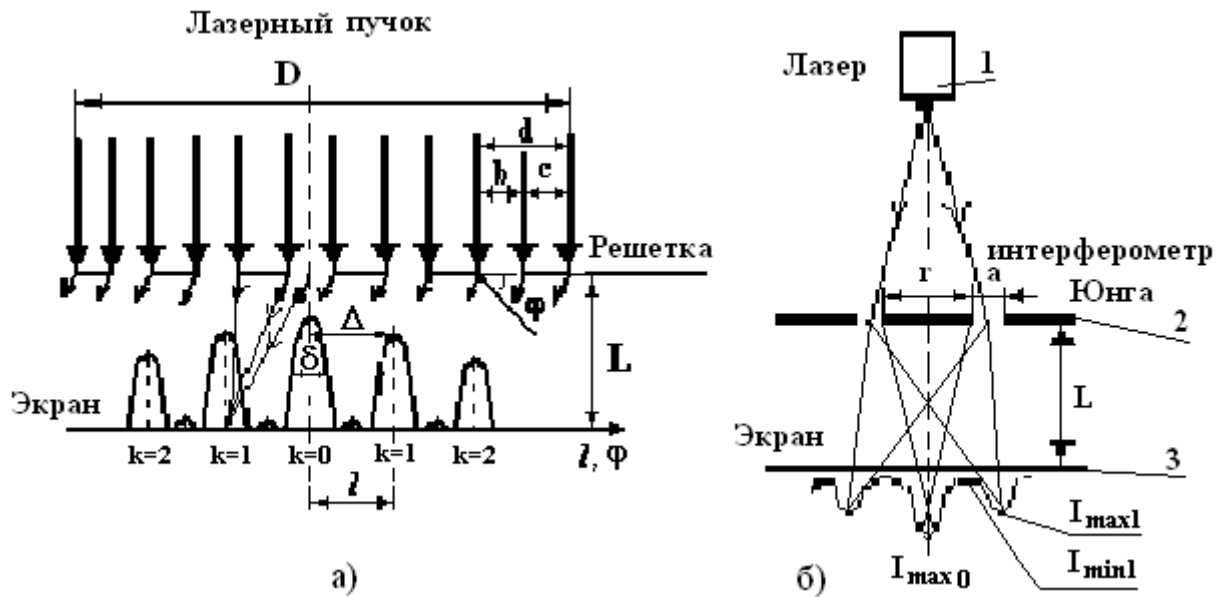


Рис. 2.3 а) Схема для измерения длины волны
б) Схема для определения пространственной когерентности лазерного пучка.

посылает в направлении φ колебание. Длина волны определяется при помощи дифракционной решетки по формуле

$$\lambda = (ld)/(kL), \quad \lambda = (xd)/(kL) \quad (2.11)$$

где k - порядок дифракционных максимумов, l - расстояние между центрами максимумов спектра. d - период решетки, L -расстояние от решетки до экрана.

Интенсивность света, дифрагированного от всей решетки, определяется квадратом амплитуды и конечное его значение имеет следующий вид:

$$I(x) = \frac{(E_0 \cdot m)^2 b^2}{D^2} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot b \cdot \ell(x)}{\lambda \cdot L}\right) \sin^2\left(\frac{\pi \cdot D \cdot \ell(x)}{\lambda \cdot L}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot b \cdot \ell(x)}{\lambda \cdot L}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \ell(x)}{\lambda \cdot L}\right)}, \quad (2.12)$$

где при расчете интенсивности по x следует заменить l на x , изменяя x в пределах D .

Для определения **пространственной когерентности** лазерного излучения используется метод Юнга. Свет от точечного монохроматического источника S (1) падает на два небольших отверстия (размером a), находящихся в непрозрачной пластине (2) на расстоянии r (r - база интерферометра) друг от друга (см. рис. 2.3,б). Эти отверстия действуют как вторичные монохроматические точечные источники, а световые пучки S_1 и S_2 от них перекрываются позади пластины на расстоянии L на экране (3) в точке $P(x,y)$. Интерференция получается в области перекрытия световых пучков (рис. 2.4).

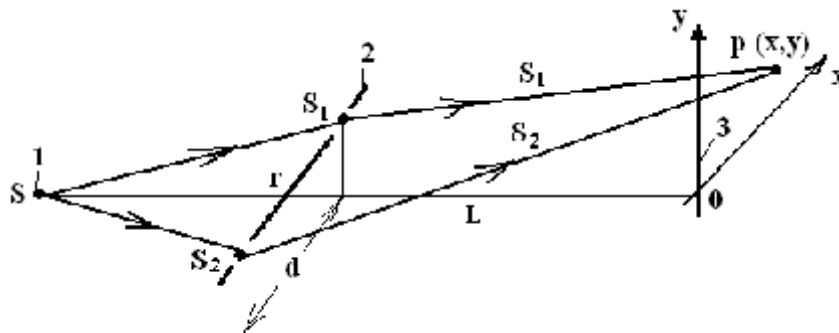


Рис. 2.4. Интерференция света от двух точечных источников

Интерференционную картину (см. рис. 2.5), полученную в плоскости (3) регистрируют фотодиодом. Интенсивность светового потока, измеренная в максимумах ($I_{\max 1}$) и минимумах ($I_{\min 1}$) интерференционной картины (как показано на рисунке 2.3,б) посылается на цифровой вольтметр или компьютер. Степень пространственной когерентности определяется по формуле (2.13)

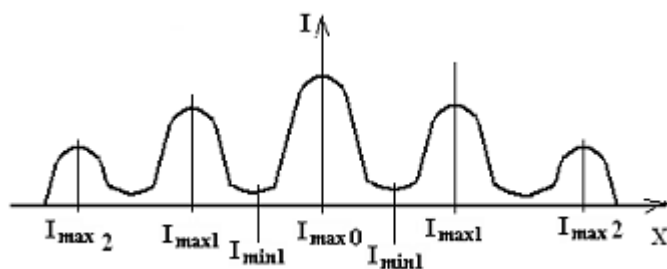


Рис.2.5

$$|\gamma_{12}| = \frac{1 - \frac{I_{\min 1}}{I_{\max 1} \left(\frac{\sin m'}{m'} \right)^2}}{1 + \frac{I_{\min 1}}{I_{\max 1} \left(\frac{\sin m'}{m'} \right)^2}}, \quad (2.13)$$

$$\text{где } m' = \frac{\pi a}{2 r}$$

Для построения графика зависимости степени пространственной когерентности от базы интерферометра, студент в процессе эксперимента должен менять значение размера базы для своего варианта 5 раз. По рисунку типа 2.4 определять значения $I_{\max 1}$ и $I_{\min 1}$. Эти параметры входят в формулу, определяющую степень когерентности (2.13). Мерой контраста интерференционной картины является ее видность w . Видность w по определению равна

$$w = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (2.14)$$

Видность интерференционной картины прямо пропорционально модулю степени когерентности $|\gamma_{12}|$. Если $I_1=I_2$, то $w = |\gamma_{12}|$.

Таким образом, для того, чтобы измерить модуль степени пространственной когерентности поля в точках x_1 и x_2 достаточно измерить видность интерференционной картины, созданной интерферометром Юнга в плоскости экрана Э (рис. 2.3,б и рис.2.4).

Диаграмма направленности и угловая расходимость

Пространственные характеристики лазера определяются распределением интенсивности света по поперечному сечению пучка и формой фазового фронта. Распределение амплитуды и фазы светового поля на выходной апертуре определяет диаграмму направленности и расходимости излучения. Высокую направленность излучения и возможность фокусировки излучения в пятно чрезвычайно малых размеров обуславливает пространственная когерентность пучка. Направленность излучения характеризуется телесным углом, в котором распространяется большая часть излучения. Чем меньше телесный угол, тем больше направленность излучения.

Теоретически плоский угол расхождения пучка ОКГ с плоскопараллельным резонатором можно определить как угол дифракции на выходном отверстии. Как известно, теоретически угловое расстояние первого дифракционного минимума от центра дифракционной картины в случае дифракции плоской волны на круглом отверстии диаметром D определяется по:

$$\theta_d = 1,22/d. \quad (2.15)$$

Для экспериментального определения угла расхождения надо знать диаметр сечения излучения d (определяется на выходе излучателя) и диаметр, измеренный на экране D . Экран устанавливается перпендикулярно оси пучка на расстоянии L от выходного отверстия генератора. Если излучение происходит в видимой области спектра, то на экране измеряются диаметры D сечения пучка на нескольких расстояниях от лазера. Угол расхождения

$$\theta = \arctg (D-d)/2L. \quad (2.16)$$

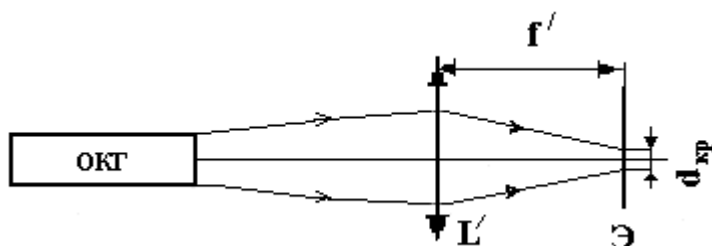


Рис. 2.6. Измерение угла расхождения пучка ОКГ с помощью линзы

Схема, приведенная на рис. 2.6, может быть использована для измерения угла расхождения как непрерывных, так и импульсных генераторов. Сущность метода заключается в измерении размера изображения, получен-

ного в фокальной плоскости линзы (L') с известным фокусным расстоянием.. Диаметр кружка равен

$$d_{кр} = 2\theta \cdot f', \quad (2.17)$$

где θ — угол расхождения пучка; f' — фокусное расстояние линзы. Отсюда угол расхождения

$$\theta = d_{кр} / 2f'. \quad (2.18)$$

Диаметр кружка, соответствующий уровню половинной интенсивности, определяется с помощью любого измерительного прибора, желательнее, конечно, типа микрофотометра.

Так как размеры резонатора полупроводниковых лазеров малы, то дифракционная расходимость, даже идеального лазера будет достаточно большой. Углы дифракционной расходимости в вертикальной $\theta_B = te_B$ и горизонтальной $\theta_r = te_r$ плоскостях равны

$$\theta_B = te_B = \frac{\lambda_0}{t} \quad \text{и} \quad \theta_r = te_r = \frac{\lambda_0}{d}, \quad (2.19)$$

где t – ширина активного слоя, а d – его толщина.

В дальней зоне отношение интенсивности излучения, распространяющегося в направлении определяемом углом θ , к интенсивности излучения а направлении $\theta=0$, равно

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \frac{[g(\theta)]^2}{[g(0)]^2} \left[\gamma \chi^2 \left(\frac{\gamma \cdot \cos [k_0(d/2)\sin \theta] - k_0 \sin \theta \sin [k_0(d/2)\sin \theta]}{(\chi^2 - k_0^2 \sin^2 \theta)(\chi^2 + k_0^2 \sin^2 \theta)} \right) \right]^2, \quad (2.20)$$

где вспомогательная функция множитель $g(\theta)$ - угловой фактор

$$g(\theta) = \frac{2 \cos \left\{ \left(\bar{n}_2^2 - \sin^2 \theta \right)^{1/2} + (\beta/k_0) \right\}}{\cos \theta + \left(\bar{n}_2^2 - \sin^2 \theta \right)^{1/2}}. \quad (2.21)$$

Он ($g(\theta)$) ведет себя почти как $\cos \theta$, \bar{n} - показатель преломления выбранного материала, $\chi^2 = \bar{n}_2^2 k_0^2 - \beta^2$, $\gamma^2 = \beta^2 - \bar{n}_1^2 k_0^2$, β^2 - постоянная распространения в среде, $n_1(x)$, $n_2(x)$ – показатели преломления для разных x (технологическая легирующая добавка), d – толщина активного слоя, β , $\gamma(x)$, $k(x)$ –коэффициенты, связанные с волновым числом k_0 , показателями преломления и толщиной активного слоя.

3. РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Рассчитать вольт-амперную характеристику (ВАХ) $I = f V_a(U_a)$ по формуле (2.3 или 3.4) в зависимости от напряжения смещения.

2. Определить пороговую плотность тока (2.5) в зависимости от длины резонатора, от коэффициентов отражения зеркал, от ширины р-п –перехода.

3. Построить зависимость пороговой плотности тока в зависимости от температуры (2.6).

4. Рассчитать по формуле (2.8) спектральную пороговую характеристику и по (2.8а) длину волны для заданного варианта.

5. Рассчитать резонансную частоту по формуле (2.10).

6. Рассчитать интенсивность света, дифрагированного от решетки (2.12).

7. Рассчитать угол расхождения пучка ОКГ по формуле (2.15).

8. Рассчитать углы дифракционной расходимости в вертикальной $\theta_v = te_v$ и горизонтальной $\theta_g = te_g$ (2.19).

9. Определить отношение интенсивности излучения, распространяющегося в направлении определяемом углом θ (2.20).

10. Определить множитель $g(\theta)$.

Данные для рассчитываемых параметров брать из таблицы П.1, П.2, П.3, приведенных в приложении. Задания для расчетов и экспериментов приведены в приложении П.4 “Варианты заданий”, (задаваемые преподавателем)” (таблица 1 и таблица 2).

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1. Воль – амперная характеристика (ВАХ)

Запустить экспериментальную установку, нажатием на файл **1_VAX.exe**, находящимся в папке “Запускающие программы”.

Открыть вкладку “Помощь” и help.

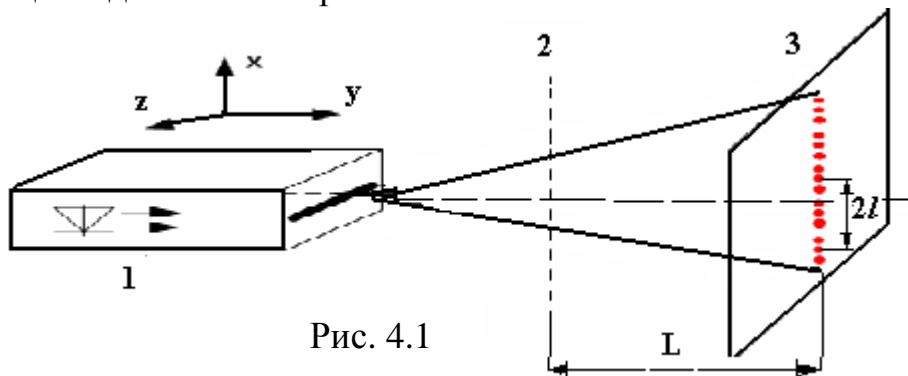
Познакомиться с экспериментальной схемой и выполнить все пункты, указанные в разделе “последовательность выполнения”. Все результаты занести в отчет.

4.1.1. Снятие зависимости $I = f(V_a)$.

4.1.2. Снятие зависимости $J = f(T)$.

4.2. Спектральные параметры

На рис. 4.2 введены следующие обозначения: 1- полупроводниковый лазер, 2- дифракционная решетка, 3- экран. Значения параметров выбираются из таблицы 1. для своего варианта.



4.2.1. Снятие длины волны как функции от превышения порогового тока " $\lambda = f(m)$ ".

Последовательность проведения лабораторной работы

Для выполнения работы: войдите в портфель "запускающие программы"

Запустить экспериментальную установку, нажатием на файл **2_SSI.exe**

1. Задать все параметры в разделе "Исходные данные". Задать текущее значение T и E_a .
2. Построить график $\lambda = f(m)$.
3. Перекопировать график $\lambda = f(m)$ в отчет.
4. Пункты 1.2.-1.3. повторить для трех значений температур в интервале 270-285; 285-290; 290 – 310. В отчете кривые для трех температур изобразить на одном графике $\lambda = f(m)$.

4.2.2. "Снятие зависимости $I = f(x)$ "

1. Задать все параметры в разделе "Исходные данные", задать текущее значение m .
2. Построить график $I = f(x)$.
3. Скопировать график $I = f(x)$ в отчет.

4.2.3 "Определение длины волны" с помощью экспериментальной установки. Открыть запускающий файл "спектральные свойства излучения.exe", находящийся в портфеле "3_ Длина волны и спектр"

1. Ввести параметры своего варианта.
2. Нажать на кнопку «построить».
3. Определить по спектральной характеристике расстояние между максимумами для второго, третьего порядка и по формуле (2.11) определить среднее значение длины волны.

4.2.4. "Определение пороговой энергии фотона $h\omega = f(U)$ "

Запустить экспериментальную установку, нажатием на файл **4_SS2.exe**

1. Задать все параметры в разделе "Исходные данные", задать текущее значение T .
2. Построить график $h\omega = f(U)$
3. Скопировать график $h\omega = f(U)$ в отчет.
4. Построить график $h\omega = f(U)$ для трех значений T , повторив пункты 3.2- 3.3. В отчете кривые для каждого значения T изобразить на одном графике $h\omega = f(U)$.

4.2.5. Определение пространственной когерентности. Войти в лабораторную работу через портфель 'Запускающие программы', затем войти в портфель «5_Когерентность». Запуск нажатием на файл **lab.exe**.

Воспользоваться вкладкой “Помощь” Прочитать указание ‘Как пользоваться программой

1. Задать все параметры в разделе "Измеряемые параметры".
2. Воспользоваться вкладкой «помощь».
3. Задать значения, нажатием соответствующей кнопки.
4. Записать в отчет, полученные значения $I_{\max 1}$ и $I_{\min 1}$, а также $R(r)$, $I_{1,x}$ (мкм), β (град).

4.3. Определение диаграммы направленности и угловой расходимости

Запустить экспериментальную установку, нажатием на файл **6_DNiR.exe**, находящимся в папке “Запускающие программы”. Открыть вкладку “Помощь” и help. Познакомиться с экспериментальной схемой и выполнить все пункты, указанные в разделе “последовательность выполнения”. Все результаты занести в отчет.

1. "Диаграмма направленности "

- 1.1. Задать значение $D_{\text{зад}}$ ($d_{\text{зад}}$) -свой вариант.
- 1.2. Задать значение $L_0(\lambda_0)$ - свой вариант.
- 1.3. Задать значение $X_{\text{зад}}$ ($x_{\text{зад}}$) свой вариант.
- 1.4. Построить графики $I=f(\theta)$, $I=f(x_{\text{зад}})$.
- 1.5. Пункты 1.3 и 1.4 повторить еще два раза, задавая различные значения $X_{\text{зад}}$, отличающиеся от первоначального.
- 1.6. Изменить параметры $D_{\text{зад}}$ или $L_0(\lambda_0)$ и повторить пункты 1.3-1.5.

2. “Угловая расходимость ”

- 2.1. Задать значение $L_0(\lambda_0), t, d$ -свои варианты.
- 2.2. Построить графики $\theta_{\text{в}} = t e_{\text{в}} = \frac{\lambda_0}{t}$; $L_0/t=f(t)$ и $\theta_{\text{г}} = t e_{\text{г}} = \frac{\lambda_0}{d}$; $L_0/d=f(d)$.
- 2.3. Пункты 2.1-2.2 повторить еще два раза, задавая значения $L_0(\lambda_0)$ отличающиеся от первоначального.
- 2.4. Задать значение t (свой вариант).
- 2.5. Построить график $\theta_{\text{в}} = t e_{\text{в}} = \frac{\lambda_0}{t}$; $L_0/t=f(L_0)$.
- 2.6. Пункты 2.4-2.5 повторить еще два раза, задавая различные значения t , отличающиеся от первоначального.
- 2.7. Задать значение d (свой вариант).
- 2.8. Построить графики $\theta_{\text{г}} = t e_{\text{г}} = \frac{\lambda_0}{d}$; $L_0/d=f(L_0)$.

2.9. Пункты 2.7-2.8 повторить еще два раза, задавая различные значения d , отличающиеся от первоначального.

2.10. Все графики занести в отчет.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете должна быть кратко сформулирована цель работы. Приведены схемы эксперимента и даны основные расчетные формулы. Результаты расчетов и исследования должны быть представлены в виде таблиц и графиков. В конце работы необходимо сделать выводы по качественному и количественному сравнению экспериментальных и теоретических результатов.

Вольт-амперная характеристика

1. Построить экспериментальные графики зависимости $I = f(V_a)$ и нанести на них расчетные результаты.

2. Построить графики зависимости $I = f(T)$ и нанести на них расчетные результаты.

3. Построить расчетные графики зависимости $I = f(L_{\text{рез}}, r_1, r_2)$.

Спектральные характеристики

1. Построить экспериментальные графики зависимости $\lambda(L) = f(m)$ и нанести на них расчетные. Сравнить с экспериментально определенными значениями длины волны λ .

2. Занести рассчитанные зависимости пороговой плотности тока в зависимости от температуры (2.6).

3. Построить экспериментальные графики зависимости $h\omega = f(U)$ и нанести на них расчетные.

4. Построить экспериментальные графики зависимости $I = f(x, \text{ либо } l)$.

5. Построить по снятым значениям $I_{\text{max}1}$ и $I_{\text{min}1}$ графики зависимости $\gamma = f(x, \text{ либо } l)$, используя формулу (2.13), все необходимые параметры заданы в таблице Т1 приложения.

6. Внести в отчет рассчитанную по формуле (2.10) резонансную частоту

7. Внести в отчет рассчитанную по формуле (2.12) интенсивность света, дифрагированного на решетке.

Диаграмма направленности и расходимость лазерного излучения

1. Внести в отчет рассчитанный по формуле (2.15) угол расхождения пучка ОКГ и сравнить с экспериментальными.

2. Внести в отчет рассчитанные по формуле (2.19) углы дифракционной расходимости в вертикальной $\theta_{\text{в}} = te_{\text{в}}$ и горизонтальной

$\theta_{\text{г}} = te_{\text{г}}$ плоскостях и сравнить с экспериментальными.

3. Внести в отчет рассчитанную величину излучения, распространяющегося в направлении определяемом углом θ (2.20). Сравнить экспериментальные и расчетные результаты.

4. Внести в отчет рассчитанную диаграмму направленности определенную через множитель $g(\theta)$. Сравнить экспериментальные и расчетные результаты.

Данные для рассчитываемых параметров брать из приложений П.1, П.2, П.3. Численные значения параметров выбираются из приведенных в приложении П.4 “Варианты заданий” и предлагаются преподавателем.

В выводах сделать сравнительный анализ результатов проведенных расчетов и экспериментальных данных.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1	Какие основные параметры полупроводниковых лазеров являются определяющими в ВОЛС?
2	Какие условия требуются для получения инверсного состояния в полупроводнике?
3	Как определяется контактная разность потенциалов?
4	Какое отличие между вырожденными и невырожденными полупроводниками?
5	На что влияет толщина активного слоя?
6	Что определяет понятие <i>инжекция</i> ?
7	Дать определение вольт-амперной характеристики.
8	Как изменяется пороговый ток с ростом температуры?
9	От чего сильно зависит плотность порогового тока?
10	В чем отличие между светодиодом и инжекционным лазером?
11	От чего зависит скорость спонтанных переходов?
12	Что такое пороговая накачка?
13	От каких параметров зависит $J_{пор}$ в полупроводниковых лазерах?
14	Чему равна энергия фотона когерентного излучения полупроводникового лазера?
15	За счет чего генерация лазеров носит многочастотный характер?
16	Что можно ожидать при превышении порогового значения плотности тока накачки
17	Как влияет температура на частотные свойства излучения?
18	От каких параметров зависит резонансная частота (ν_r) ?
19	Что определяет степень пространственной когерентности?
20	Как определяется степень пространственной когерентности?
21	Увеличивается или уменьшается направленность излучения при уменьшении телесного угла?
22	Чем характеризуется направленность излучения?
	3. Какая из формул определяет угол дифракционной расходимости в

	вертикальной плоскости? $\theta = \frac{\lambda}{t}$ где, t- ширина активного слоя. $\theta = \frac{\lambda}{d}$ где, d- толщина.
23	Какая из формул определяет угол дифракционной расходимости в горизонтальной плоскости? $\theta = \frac{\lambda}{t}$ где, t- ширина активного слоя. $\theta = \frac{\lambda}{d}$ где, d- толщина.
24	Чем определена дифракционная расходимость в полупроводниковых лазерах?
25	От чего зависят угловые характеристики излучения ОКГ?

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 2001.
2. Х. Кейси, М Паниш. Лазеры на гетероструктурах. 1том –М.: Мир 1981,299 с.
3. Х. Кейси, М Паниш. Лазеры на гетероструктурах. 2том –М.: Мир 1981,363 с.
- 4.Елисеев П.Г. Введение в физику инжекционных лазеров.- М.: Наука, 1983, 311с.
- 5.Смирнов А.Г. Квантовая электроника и оптоэлектроника: Учеб. пособие для вузов. - Мн.: Выш. шк., 1987, 271 с.
- 6.Дж. Гауер. Оптические системы связи: Пер с англ. – М.:-Радио и связь. 1989. 504с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1 Обозначения и диапазон параметров для GaAs и GaAlAs/GaAs при расчете ВАХ- вольт-амперной характеристики,

d_2 -толщина р-п- перехода полупроводникового образца $(0,1 \div 5) \cdot 10^{-6}$, м ;

k- постоянная Больцмана $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град;

e- заряд электрона $q=1,6 \cdot 10^{-23}$ к;

S - площадь р-п перехода, $0,5 \cdot 10^{-9} \div 10 \cdot 10^{-9}$, м²;

L_n – диффузионная длина пробега электронов, $5 \cdot 10^{-6} \div 18 \cdot 10^{-6}$, м;

n_p - концентрация электронов в р-области; $(1 \div 10)10^{23}$ - число частиц на метр,

\bar{n} - показатель преломления, $3,4 \div 4$, м;

\mathcal{E} (ΔE_q) -энергия фотона в спектральной линии излучения, для GaAs 1,47эВ;

ΔE – ширина спектральной линии для GaAs 0,023 эВ;

r_1 и r_2 - коэффициенты отражения граней, 0,33.

$\eta_{\text{внут}}$ – внутренняя квантовая эффективность, 0,6÷0,8;

h -постоянная Планка, $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

α - общие потери;

$\alpha_{\text{рас}}$ - коэффициент рассеяния, $1 \text{ мм}^{-1} \text{ м}^{-1} = 10^3$, м^{-1} ;

$L_{\text{рез}}$ – длина резонатора, $(30 \div 300) \cdot 10^{-6}$, м;

ϵ_0 -электрическая постоянная, $8,85 \cdot 10^{-12}$, ф/м;

V_a (U_a) -текущее значение напряжения смещения, В;

П2. Условные обозначения параметров, их пределы и формулы при расчете спектральных характеристик

a - размер щели в интерферометре Юнга, мкм (25÷100)

b - щель дифракционной решетки $1/2d$

d -толщина активного слоя, мкм (0,5÷ 20); постоянная (период) диф. решетки, мкм (1÷15) $d=D/N=(k \cdot \lambda)/\alpha$; апертура луча лазера, мм (1-5)

k - постоянная Больцмана Дж/К, $(1,38 \cdot 10^{-23})$;

k - порядок спектра $k=1,2 \dots k=(d \cdot l)/(L \cdot \lambda)$

l – расстояние между максимумами на экране, м ($l=\sin \varphi \cdot L$)

m –логарифм $\ln(j/j_0)$ коэффициента усиления по току, превышение над пороговым током, раз (1,2÷3);

m' - пропорциональное соотношение между отверстием (a) и базой (r) интерферометра Юнга.

\bar{n} - усредненный показатель преломления среды, (2÷4)

n - число штрихов на 1 см, $n=N/D=1/d= \sin \varphi / (k \cdot \lambda)$

n_0 - плотность электронов, см^{-3} (2÷4) $\cdot 10^{-23}$

r –база интерферометра Юнга, мкм (50÷200)

α - расходимость пучка лазера, рад. $\alpha = (\pi \cdot b \cdot \sin \varphi)/\lambda$;

α -общие потери

δ - ширина главного максимума спектра, нм ($\Delta \lambda/N$)

$\Delta \lambda$, l - расстояние между центрами максимумов спектра

β - угол поворота плоскости решетки относительно оси резонатора, сек (10-150)

λ - длина волны, мкм (0,5÷4), $\lambda=(d \cdot l)/(L \cdot k)$

φ - углы, соответствующие \max или \min положению спектральных линий на экране от дифракционной решетки, град,

$\varphi = \arcsin (l / L) = \arcsin (k \lambda / d)$

τ_n - Время жизни электронов, с (1÷9) $\cdot 10^{-9}$

τ_p - Время жизни протонов, с (1÷3) $\cdot 10^{-12}$

$\tau_{\text{когер}}$ – время когерентности, с $\tau_{\text{когер}}=1/\delta$

γ -разность хода между соседними щелями, м ($\gamma=d \cdot \sin \varphi$)

D – длина решетки, м (15÷150) $\cdot 10^{-3}$, ($D=d \cdot N$)

1	1	0,8	553	280	0,33	100-350	10^{-7}	$10 \cdot 10^{-8}$	59	1	2	2
2	1,5	1,2	481	260	0,34	150-500	$0,5 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	58	2	4	4
3	2	1,3	430	400	0,35	100-500	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	57	3	6	6
4	2,5	1,32	381	320	0,33	50-400	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}$	56	4	8	8
5	3	2,0	351	250	0,33	50-600	$0,4 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}	55	5	10	10
6	1	2,40	322	200	0,36	100-600	10^{-4}	$0,8 \cdot 10^{-7}$	54	1	12	12
7	1,5	2,50	281	350	0,37	100-500	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-7}$	53	2	14	14
8	2	1,1	254	300	0,36	80-600	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-7}$	52	3	16	16

В таблице 1 заданы: λ (мкм) – длина волны исследуемого лазера, d (мкм) – толщина p - n -перехода, r_1, r_2 - коэффициенты отражения выходных торцов резонатора, L (мкм) – длина резонатора, g – база интерферометра Юнга, мкм (50÷200), a - размер щели в интерферометре Юнга, мкм (30÷90), $\tau_{изл}$, с – время жизни излучательного перехода, $\tau_{б.изл}$, с – время жизни безизлучательного перехода, n -показатель преломления образца, I , (мВт) – интенсивность излучения, d ,(мм) период интерференционной решетки.

Продолжение вариантов заданий для лабораторной работы по исследованию диаграммы направленности и расходимости

Таблица 2

№	$x_{зад}$	d (мкм)	t_e ,град	t (мкм)	f' ,см	$D_{зад}$, мкм	$\lambda_0(L_0)$ мкм
1	0,3	0,05	20	20	3	0,01	0,8
2	0,35	0,06	40	25	5	0,02	0,9
3	0,4	0,08	60	30	10	0,04	0,95
4	0,45	0,10	80	35	16	0,06	1,05
5	0,5	1,12	20	40	14	0,08	1,1
6	0,55	1,14	40	45	12	0,1	1,15
7	0,6	1,16	60	50	15	1,2	1,2
8	0,65	1,18	80	30	20	1,4	1,25

В таблице.2 заданы: $\lambda_0(L_0)$ (мкм) – длина волны исследуемого лазера, $x_{зад}$ – технологическая легирующая добавка, 0,3÷0,6, d (мкм) – толщина p - n -перехода, t_e - угловая расходимость, t - ширина p - n - перехода полупроводниковой области, f' - фокусное расстояние линзы, (3÷20) см.