

### *Лабораторная работа 3*

## **Определение эффективности ввода излучения полупроводникового лазера в одномодовый волоконный световод**

*Цель работы* – измерение расходимости пучка излучения полупроводникового лазера с визуализацией электронно-оптическим преобразователем, расчет коэффициента ввода этого пучка в одномодовый волоконный световод.

*Полупроводниковые лазеры (ППЛ)* в настоящее время являются наиболее массовым типом лазера. Их годовой выпуск достигает миллионов экземпляров. ППЛ широко используются в устройствах записи и считывания информации (CD-ROM, CD-проигрыватель), волоконных линиях связи, лазерных принтерах и других современных приборах. Полупроводниковые лазеры имеют такие практические достоинства [12, 13]:

- компактность, обусловленная гигантским коэффициентом усиления в полупроводниках;
- высокий КПД, связанный с высокой эффективностью преобразования подводимой энергии в лазерное излучение при накачке достаточно совершенных полупроводниковых монокристаллов электрическим током;
- широкий диапазон длин волн генерации, определяемый возможностью выбора полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны, соответствующей излучению на переходах зона-зона практически в любой точке спектрального интервала от 0,3 мкм до 30 мкм;
- возможность плавной перестройки длины волны излучения, обусловленная зависимостью спектрально-оптических свойств полупроводников и, прежде всего, ширины запрещенной зоны от температуры, давления, магнитного поля и других внешних факторов;
- малая инерционность, определяемая небольшим временем релаксации носителей заряда и практически безынерционным возникновением неравновесных электронов и дырок при накачке электрическим током, что приводит к возможности модуляции излучения изменением тока накачки с частотами, достигающими 10 ГГц;
- простота конструкции, обусловленная возможностью накачки постоянным током, что делает ППЛ совместимыми с интегральными схемами полупроводниковой электроники, устройствами интегральной оптики и волоконных оптических линий связи;
- небольшая стоимость.

Недостатки полупроводниковых лазеров являются следствиями их достоинств: малые размеры приводят к низким значениям выходной мощности; как и все приборы полупроводниковой электроники, ППЛ чувствительны к оптическим перегрузкам и перегреву.

Лазерная генерация получена при использовании нескольких десятков полупроводниковых материалов. Наибольшее распространение получили ППЛ на основе арсенида галлия (GaAs) и более сложных соединений типа (Ga + Al)As, (Ga + In)As, Ga(As + P) и других. Для ограничения размеров области, в которой возникает усиление, и повышения ее волноводных свойств используют многослойные гетероструктуры. Заметим, что только применение двойных гетеропереходов позволило разработать полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Наиболее распространенным типом накачки ППЛ является возбуждение полупроводников постоянным током, который пропускается через полупроводниковый диод в прямом направлении. Весьма высокой эффективностью обладает также электронно-лучевая накачка, приводящая к генерации лазерного излучения, в том числе и коротковолнового диапазона.

Мощности единичных лазерных диодов, работающих в непрерывном режиме, достигают в настоящее время 0,5 Вт для красной области видимого спектра и 2 Вт для инфракрасного (ИК) диапазона. Несколько лазерных

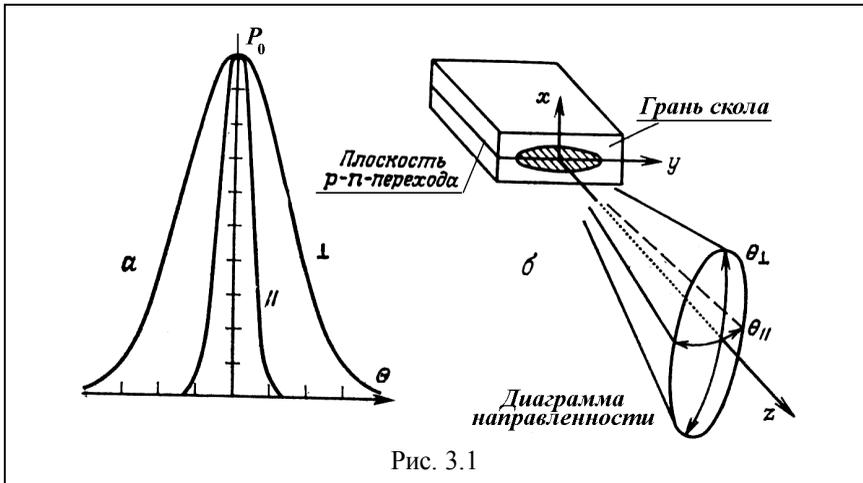


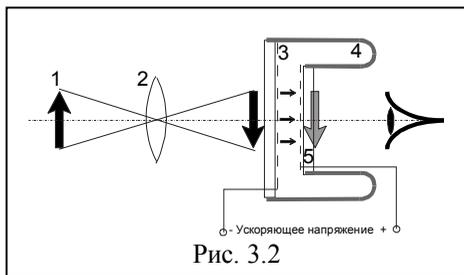
Рис. 3.1

диодов могут быть конструктивно объединены в многоэлементную решетку (блок или линейку ППЛ). Излучение такой двумерной матрицы, объединенное специальной оптической системой, может достигать мощности в несколько киловатт и использоваться для обработки материалов.

Диаграмма направленности (ДН) полупроводниковых лазеров изображена на рис. 3.1 (а – зависимость мощности излучения ППЛ от угла расходимости  $\theta$ , б – главный лепесток ДН). Она существенно шире, чем у газовых лазеров, где угловые размеры ДН определяются в основном дифракционной расходимостью излучения. Кроме того, диаграмма направленности полупроводникового лазера несимметрична: она примерно в два раза шире в плоскости, перпендикулярной плоскости р-п перехода, чем в плоскости самого перехода. В случае, когда ППЛ генерирует несколько мод, наблюдается несколько боковых лепестков ДН в дальней зоне. Для уменьшения расходимости пучка полупроводниковые лазеры часто оборудуют компенсирующей оптической системой. В этом случае ППЛ создает гауссов пучок почти кругового сечения.

Излучающая апертура ППЛ (заштрихованная область на рис. 3.1б) представляет собой эллипс, имеющий примерные размеры 1 мкм X 5 мкм.

Большинство современных полупроводниковых лазеров работают в ИК диапазоне длин волн, что существенно затрудняет измерение параметров их пучков с использованием визуально-оптических методов. Для наблюдения инфракрасного излучения в системах оптического контроля применяют *электронно-оптические преобразователи (ЭОП)* [14].



Простейший ЭОП (рис. 3.2) представляет собой вакуумированную стеклянную колбу 4 в виде стакана с параллельными передней и задней стенками, на которые нанесены соответственно полупрозрачный фотокадод 3 и флюоресцирующий экран с полупрозрачным электродом 5. Между электродами прикладывают

ускоряющее напряжение порядка нескольких киловольт. Изображение объекта 1 в ИК лучах проектируется объективом 2 на фотокадод 3. Вылетевшие из фото катода электроны ускоряются электрическим полем и, бомбардируя экран 5, вызывают его свечение. Интенсивность свечения отдельных точек экрана определяется интенсивностью электронного потока, которая, в свою очередь, зависит от яркости освещения фото катода ИК излучением объекта. Таким образом, невидимое изображение, созданное объективом 2 на фото катоде 3, преобразуется в видимое изображение на экране 5.

Максимальная разрешающая способность простейшего ЭОП не превышает 10-12 линий/мм, для ее увеличения используют электростатическую или магнитную фокусировку электронов. Для повышения чувствительно-

сти ЭОП применяют последовательное включение двух или более ЭОП (т.н. каскадные, или многокамерные преобразователи). Другой путь увеличения чувствительности – усиление электронного потока при помощи микроканальных пластин (в микроканалах электроны при движении между стенками ускоряются электрическим полем, а при столкновениях со стенками каналов – выбивают за счет полученной от поля энергии вторичные электроны).

### Методика выполнения работы

Лабораторная установка состоит из полупроводникового лазера ИЛПН-301 (длина волны  $\lambda = 0,85$  мкм, максимальная мощность  $P_0 = 1$  мВт), закрепленного на столе и связанного с блоком питания; электронно-оптического преобразователя из комплекта прибора ночного видения ПНВ-57Е со своим блоком питания (постоянное напряжение 12 В или 24 В избирается прибором автоматически) и разграфленного матового экрана, который перемещается по оптической скамье вдоль линейки. Расстояние между длинными штрихами на экране равно 1 см, короткие штрихи нанесены посередине между длинными.

СЛЕДУЕТ ПОМНИТЬ, что прибор ночного видения ПНВ-57Е можно включать при освещенности не более, чем 1 лк. Включение прибора при дневном свете может вывести из строя ЭОП, поэтому такое включение – без крышек на объективах – категорически запрещено. Для ослабления света и увеличения глубины резкости в крышках объективов сделаны отверстия, так что рабочее положение крышек объективов – закрытое. Снимать эти крышки при включенном приборе категорически запрещено. Запрещается также отсоединять кабели ПНВ и касаться его оптических деталей.

Измеряя с помощью ЭОП диаметр пятна  $D$  лазерного излучения, наблюдаемого на экране, и по линейке – расстояние до экрана  $L$ , определим расходимость пучка  $\theta$ :

$$\theta = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{D}{2L} \right). \quad (1)$$

При падении пучка излучения лазера на входной торец световода часть мощности этого пучка  $P_i$  трансформируется в мощность  $P$ , переносимую направляемыми модами световода, а часть ее отражается от входного торца и переходит в моды излучения. Таким образом, эффективность ввода излучения в волоконный световод  $\kappa$  без использования согласующих устройств равна

$$\kappa = P/P_i. \quad (2)$$

В общем случае значение  $\kappa$  сложным образом зависит от параметров падающего пучка, характеристик световода и ориентации пучка относительно оси световода.

Так как используемый в работе ППЛ имеет компенсирующее устройство, то гауссов пучок излучения в плоскости входного торца волокна с хорошей степенью точности можно считать круговым. Мощность этого пучка  $P_1$  пропорциональна квадрату его радиуса  $r_{\text{п}}^2$ , который определяет соотношение

$$r_{\text{п}}^2 = r_{\text{п}0}^2 + \left(\frac{\theta}{2}z\right)^2, \quad (3)$$

где начальный радиус пучка  $r_{\text{п}0} \sim 5$  мкм,  $z$  – расстояние от излучающей апертуры компенсирующей системы лазера до торца световода. Считая, что торец волокна расположен практически вплотную к излучателю ( $z \sim r_{\text{п}0}$ ), для оценки  $r_{\text{п}}^2$  окончательно получим

$$r_{\text{п}}^2 \cong r_{\text{п}0}^2 \left[ 1 + \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \right]. \quad (4)$$

В современных оптоволоконных линиях связи совместно с ППЛ наиболее часто используют *одномодовые световоды*. Эти световоды имеют ступенчатый профиль показателя преломления, причем различие в значениях показателя преломления сердцевины  $n_1$  и оболочки  $n_2$  невелико. Параметр высоты профиля

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (5)$$

для одномодовых световодов лежит в интервале:

$$0,03 \leq \Delta \leq 0,1. \quad (6)$$

Световоды с  $\Delta \ll 1$  принято называть *слабонаправляющими* [15], так как количество направляемых мод в них мало. В то же время они обеспечивают значительную концентрацию излучения в сердцевине, т.е. реально *сильную* направляемость мод.

В одномодовом световоде вся канализируемая им мощность переносится основной модой. Радиальное распределение поперечного поля этой моды на торце световода  $F(r)$  можно аппроксимировать гауссовым распределением вида

$$F(r) = \exp\left\{-r^2/r_0^2\right\}, \quad (7)$$

где

$$r_0 = \frac{\rho_0}{\sqrt{2|\ln V|}} \quad (8)$$

– радиус пятна моды, который определяют радиус сердцевины  $\rho_0$  и волоконный параметр световода  $V$ :

$$V = \frac{2\pi\rho_0 n_1}{\lambda} \sqrt{2\Delta} . \quad (9)$$

Волоконный световод является одномодовым, если  $0 < V < 2,405$ . Реально значения параметра  $V$  для таких световодов лежат в интервале

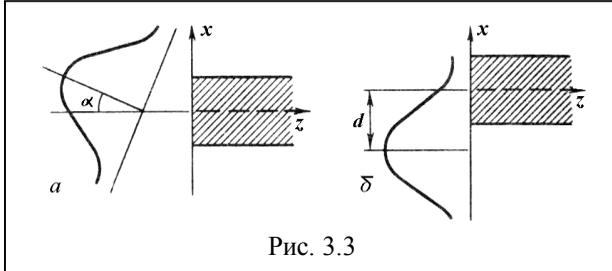
$$1,65 \leq V \leq 2,405 . \quad (10)$$

Исходя из (8) и (9) для радиуса пятна моды  $r_0$  получим соотношение

$$r_0 = \frac{V\lambda}{4\pi n_1 \sqrt{\Delta|\ln V|}} . \quad (11)$$

В приближении слабонаправляющих световодов эффективность ввода мощности лазерного излучения в волокно дает соотношение [15]:

$$\kappa = 4 \frac{r_0^2 r_{\text{п}}^2}{(r_0^2 + r_{\text{п}}^2)^2} \exp \left\{ - \frac{(k\alpha r_0 r_{\text{п}})^2 + d^2}{r_0^2 + r_{\text{п}}^2} \right\} , \quad (12)$$



где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\alpha$  – угол наклона оси возбуждающего пучка к оси световода (рис. 3.3а),  $d$  – смещение оси пучка относительно оси световода (рис. 3.3б).

### Порядок выполнения работы

1. Измерение расходимости излучения ППЛ
  - 1.1. Включить блок питания полупроводникового лазера и дать ему прогреться 2-3 минуты, потом включить генерацию ППЛ кнопкой “ИЗЛУЧ”.
  - 1.2. Проверив наличие крышек на объективах прибора ночного видения, включить его. Следует избегать прямого попадания излучения лазера в глаза.
  - 1.3. Используя ЭОП, измерить диаметр  $D$  пятна лазерного излучения на экране при нескольких значениях расстояния от лазера до экрана  $L$ .

- 1.4. С помощью формулы (1) рассчитать среднюю расходимость пучка излучения ППЛ. Оценить погрешность измерения.
- 1.5. Выключить ПНВ и ППЛ.
2. Расчет эффективности ввода излучения ППЛ в одномодовый волоконный световод
  - 2.1. Исходя из соотношения (4), найти радиус пучка на торце световода  $r_{\text{п}}$  при прямом возбуждении с помощью исследуемого ППЛ.
  - 2.2. Выбрать из таблицы 3.1 типичные для одномодовых световодов параметр высоты профиля  $\Delta$  (номер  $N_1$ ) и волоконный параметр  $V$  (номер  $N_2$ ). Числа  $N_1$  и  $N_2$  определяет преподаватель.

Таблица 3.1

$N_1$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta$	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
$N_2$	1	2	3	4	5	6	7	8
$V$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4

Считая показатель преломления сердцевины  $n_1 = 1,5$ , с помощью соотношения (11) найти для такого световода радиус пятна моды  $r_0$  при  $\lambda = 0,85$  мкм.

- 2.3. Подставляя рассчитанные значения  $r_{\text{п}}$  и  $r_0$  в формулу (12), определить максимальную эффективность ввода излучения ППЛ в световод  $\kappa_{\text{max}}$  ( $\alpha = 0, d = 0$ ).
- 2.4. Полагая предельно допустимым снижение уровня мощности сигнала лазера при его вводе в световод на  $\delta = 60$  дБ от уровня полной технологической мощности исследуемого лазера  $P_0$  (за счет потерь в компенсирующей системе ППЛ мощность падающего пучка  $P_1 \approx 0,9P_0$ ), определить область допустимых значений угла ввода излучения  $\alpha$  и несоосности пучков  $d$ . Для этого на плоскости  $(d, \alpha)$  построить график кривой, следующий из (12):

$$\left(\frac{a\alpha}{b}\right)^2 + \left(\frac{d}{b}\right)^2 = A, \quad (13)$$

где  $a = (kr_0r_{\text{п}})^2$ ;  $b = r_0^2 + r_{\text{п}}^2$ ;  $A = (0,1\delta - \lg 0,9\kappa_{\text{max}})/\lg e$ .

- 2.5. Сделать вывод о возможности технической реализации найденных в п.2.4 значений параметров рассогласования  $d, \alpha$ .