

**И. Г. Кирин**

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Оренбург  
2013

**УДК 621.3**  
**ББК 32.86**  
**К 43**

**Кирин И. Г.**  
**К 43** Лазерные технологии. Учебное пособие: Лабораторный практикум / И. Г. Кирин. – Оренбург, 2013. – 66 с.

**ISBN - 978-5-9723-0137-9**

Лабораторный практикум содержит следующие группы работ: работы, посвященные изучению характерных свойств лазерного излучения; работы, позволяющие изучать лазерные системы съема и передачи информации; работы по лидарным системам и линиям передачи энергии и лабораторные работы, позволяющие изучать особенность освещения и рассеяния различными объектами лазерного излучения.

При разработке лабораторного практикума особое внимание уделялось элементной базе, на которой могут быть построены работы. Прежде всего, предпочтение отдавалось выпускаемому промышленностью учебному оборудованию, элементы и узлы, входящие в состав лабораторных установок, разработаны таким образом, чтобы они могли быть изготовлены самостоятельно.

Лабораторный практикум рассчитан на применение в составе спецкурсов, направленных на изучение основ лазерной техники и лазерных технологий, вузов, курса физики.

**ISBN - 978-5-9723-0137-9**

**УДК 621.3**  
**ББК 32.86**

© Кирин И. Г., 2013  
© Оформление. ФГБОУ ВПО «ОГИМ», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1. Лабораторная работа</b>	
«Измерение расходимости лазерного луча» .....	7
<b>2. Лабораторная работа</b>	
«Поляризация лазерного излучения» .....	11
<b>3. Лабораторная работа</b>	
«Монохроматичность лазерного излучения».....	15
<b>4. Лабораторная работа</b>	
«Изучение яркости лазерного излучения».....	20
<b>5. Лабораторная работа</b>	
«Когерентности лазерного излучения».....	24
<b>6. Лабораторная работа</b>	
«Изучение диаграммы направленности полупроводниковых светодиодов» .....	31
<b>7. Лабораторная работа</b>	
«Изучение ватт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров» .....	35
<b>8. Лабораторная работа</b>	
«Лазерные линии связи».....	40
<b>9. Лабораторная работа</b>	
«Определение освещенности объекта лазерным излучением» ...	44
<b>10. Лабораторная работа</b>	
«Определение диаграммы направленности отраженного от объекта лазерного излучения».....	49
<b>11. Лабораторная работа</b>	
«Лазерный микрофон».....	53
<b>12. Лабораторная работа</b>	
«Изучение лидара».....	56
<b>13. Лабораторная работа</b>	
«Лазерная линия передачи энергии».....	62

## ВВЕДЕНИЕ

Разработанный лабораторный практикум включает следующие специально разработанные для практикума лабораторные работы [8]: «Измерение расходимости лазерного луча»; «Поляризация лазерного излучения»; «Монохроматичность лазерного излучения»; «Изучение яркости лазерного излучения»; «Когерентности лазерного излучения»; «Изучение диаграммы направленности полупроводниковых светоизлучателей»; «Изучение ватт-амперной характеристики полупроводниковых излучателей»; «Лазерные линии связи»; «Определение диаграммы направленности отраженного от объекта лазерного излучения»; «Лазерный микрофон»; «Изучение лидара»; «Лазерная линия передачи энергии».

Условно лабораторный практикум может быть разделен на следующие группы: работы, посвященные изучению уникальных свойств лазерного излучения: расходимости, поляризации, монохроматичности, яркости, когерентности («Поляризация лазерного излучения»; «Монохроматичность лазерного излучения»; «Изучение яркости лазерного излучения»; «Когерентности лазерного излучения»); лабораторные работы, посвященные изучению полупроводниковых лазеров, основных источников оптического излучения, используемых в составе различных волоконно-оптических и оптоэлектронных систем («Изучение диаграммы направленности полупроводниковых светоизлучателей» [3]; «Изучение ватт-амперной характеристики полупроводниковых излучателей» [4]); лабораторные работы, позволяющие изучать применение лазеров в современных информационных технологиях («Лазерные линии связи» [1], «Лазерный микрофон», «Лазерная линия передачи энергии» [7]), лабораторная работа, посвященная изучению применения лазеров в системах экологического контроля («Изучение лидара» [2]); лабораторные работы по определению освещенности объекта лазерным излучением и определению диаграммы направленности отраженного от объекта лазерного излучения – характеристикам взаимодействия лазерного излучения с различными объектами,

имеющими важное значение при технологических применениях лазеров не только в промышленности, но и в медицине («Определение освещенности объекта лазерным излучением» [6]; «Определение диаграммы направленности отраженного от объекта лазерного излучения» [5]).

При разработке лабораторного практикума особое внимание уделялось элементной базе, на которой могли быть построены работы. Прежде всего, предпочтение отдавалось выпускаемому промышленностью учебному оборудованию [9]. Элементы и узлы, входящие в состав лабораторных установок, разработаны таким образом, чтобы они могли быть изготовлены самостоятельно с использованием распространенных и доступных материалов и компонент.

Лабораторные работы практикума позволяют в достаточно широких пределах варьировать объемом выполняемых заданий и их сложностью, а также выполнять и исследовательские задания.

### **Литература**

1. Кирин И. Г. Лабораторная работа «Лазерные линии связи» / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук // Учебная физика. – 2009. – № 4. – С. 27–28.

2. Кирин И. Г. Лекционная демонстрация «Лидар» / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук, В. В. Комиссарова // Учебная физика. – 2008. – № 1. – С. 111–112.

3. Кирин И. Г. Изучение диаграммы направленности светодиодов / И. Г. Кирин, М. И. Кирина, А. В. Репьев // Учебная физика. – 2008. – № 2. – С. 85–88.

4. Кирин И. Г. Изучение ватт-амперной характеристики светодиодов / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук // Учебная физика. – 2008. – № 1. – С. 103–105.

5. Кирин И. Г. Лабораторная работа по определению диаграммы направленности отраженного от объекта света / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук, С. Ф. Гумарова // Учебная физика. – 2008. – № 2. – С. 88–89.

6. Кирин И. Г. Лабораторная работа по определению освещенности объекта световодом и проверке закона освещенности / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук, С. Ф. Гумарова // Учебная физика. – 2008. – № 2. – С. 78–80.

7. Кирин И. Г. Изучение источников дистанционного электропитания на базе световодов / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук // Учебная физика. – 2008. – № 1. – С. 106–108.

8. Кирин И. Г. Лабораторный практикум по лазерным технологиям / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук // Научный вестник Оренбургского государственного института менеджмента: Сборник материалов конференции «Инновационная деятельность; наука – экономика – производство». – Оренбург: Оренб. гос. ин-т менеджмента, 2008. – С. 345–346.

9. Учебное оборудование для кабинетов физики общеобразовательных учреждений // под ред. Г. Г. Никифорова. – М.: Дрофа, 2005. – 396 с.

## 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА»

*Лабораторная работа посвящена изучению расходимости лазерного луча, важнейшей характеристике лазеров, объясняемой свойствами индуцированного излучения и воздействием резонатора.*

Лазерное излучение обладает свойством остронаправленности. Это объясняется как свойством индуцированного излучения, так и воздействием резонатора. Однако, несмотря на это, из-за явления дифракции строго параллельный пучок света получить принципиально невозможно. Как известно, при любом ограничении фронта волны имеет место дифракция. Так как при генерации света в лазере фронт световой волны ограничивается окружностью основания кристалла рубина или же зеркала диаметром  $D$ , то, согласно теории дифракции, угол минимального расхождения лучей определяется из следующего условия:

$$\Theta_{\min} \geq 1,22 \lambda / D.$$

Углы расхождения составляют соответственно для газовых лазеров  $1'-2'$ , для рубиновых  $7'-9'$ , для полупроводниковых  $1^\circ-2^\circ$ . Диаметр расхождения таких лучей у поверхности Луны при ее локации составляет всего 3 км.

Расходимость лазерного луча принято определять по формуле:

$$\varphi = 2\alpha = \frac{d_2 - d_1}{L} \frac{360^\circ \cdot 60'}{2\pi},$$

где  $\varphi$  – легко найти, измерив угол  $\alpha$ , учитывая, что  $\varphi = 2\alpha$ .

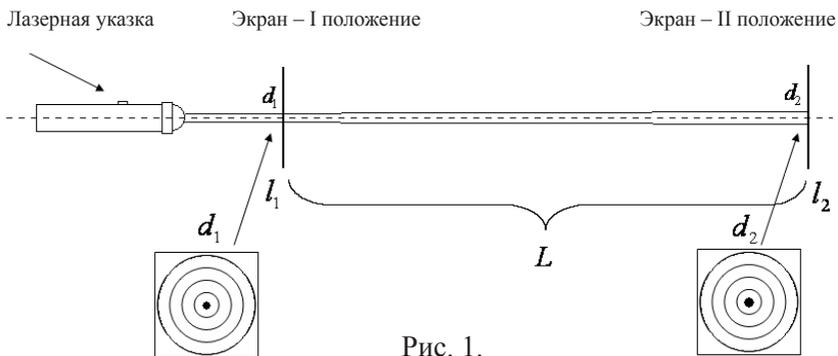


Рис. 1.

Очевидно, для измерения угла  $\alpha$  нужно измерить диаметр пятна  $d_1$  и диаметр пятна  $d_2$  при двух положениях экрана и расстояние  $L$  между этими положениями (рис. 1).

Тогда, полагая для малых углов (рис. 2):

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{d_2 - d_1}{2L} \text{ и } \sin \alpha \approx \alpha,$$

можно написать  $\alpha = \frac{d_2 - d_1}{2L}$ .

Так как величина угла  $\alpha$  получена в радианах, то ее нужно перевести в угловые минуты:

$$\alpha = \frac{d_2 - d_1}{2L} \frac{360^\circ \cdot 60'}{2\pi}.$$

Искомый угол расхождения в минутах:

$$\varphi = 2\alpha = \frac{d_2 - d_1}{L} \frac{360^\circ \cdot 60'}{2\pi}.$$

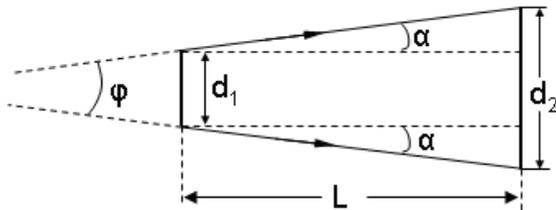


Рис. 2.

Схема лабораторной установки для измерения расходимости лазерного излучения показана на рис. 3.

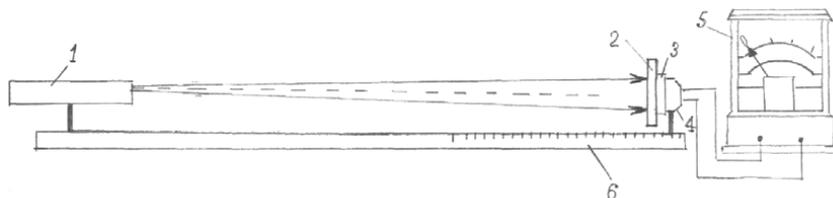


Рис. 3.

Лабораторная установка состоит из лазерной указки 1, перемещающейся в горизонтальном направлении щели с устройством отсчета перемещения 2 (микропозер), фильтра 3 с фотоприёмником 4, микроамперметра 5.

Все элементы экспериментальной установки расположены на одной оси и закреплены на оптическом рельсе 6, снабженного шкалой для отсчета перемещений.

В работе определяется угловая расходимость исследуемого лазерного излучения.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 3, собирается установка.

2. На расстоянии около 5–10 см от лазерной указки устанавливается микропозер (устройство для перемещения на малые расстояния с системой измерения этих расстояний) с экраном, имеющим отверстие  $\sim 1$  мм.

3. Включается лазерная указка. Перемещая экран в горизонтальной плоскости фиксируется ток  $\mu A$  микроампера при различных положениях отверстия экрана  $\mu$  (рис. 4, положение I).

4. По точкам строится график зависимости  $I(\mu)$ , где  $I$  – показания микроампер,  $\mu$  – расстояние от отверстия до оси лазерного пучка. Из графика по высоте средней линии определяется диаметр светового пучка лазера пятна  $d_1$ .

5. Затем микропозер с экраном, фильтр и фотоприемник отодвигаются на 1–1,5 метра от первоначального расстояния, и выполняются действия п. 3 и 4. Определяется диаметр светового пучка лазера  $d_2$  (рис. 4, положение II).

6. По формуле:

$$\varphi = 2\alpha = \frac{d_2 - d_1}{L} \frac{360^\circ * 60'}{2\pi}$$

вычисляется расходимость лазерного излучения.

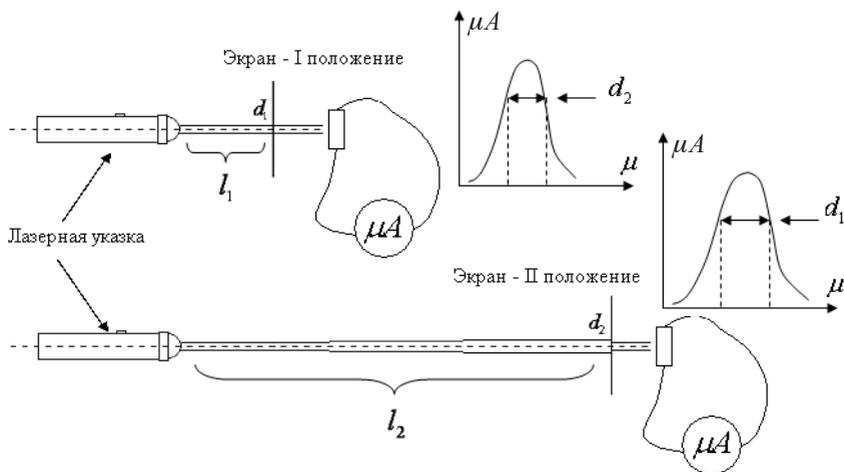


Рис. 4.

В составе лабораторной установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку, фотоприемником может служить фотодиод ФД-256.

#### Литература

1. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов / под ред. Р. А. Валитова. – М.: изд-во Госстандарта, 1990. – 184 с.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

*Лабораторная работа посвящена изучению поляризации лазерного излучения, характеристике лазеров, связанной со свойствами оптического резонатора и с особенностями активной среды.*

Лазеры характеризуются высокой степенью поляризованности излучения, что является следствием когерентности их излучения. Однако вид поляризации (линейная, круговая, эллиптическая) у разных лазеров может быть различен. В большинстве случаев тип поляризации связан со свойствами оптического резонатора, а иногда и с особенностями активной среды (среда во внешнем магнитном поле). Резонаторы газовых лазеров с очень сильной амплитудной анизотропией, создаваемой брюстеровскими «окнами» разрядной трубки или внутренними призмами, имеют устойчивую линейную поляризацию.

Для промышленных лазеров с линейной поляризацией степень поляризованности, т. е. отношение интенсивностей света при взаимно-ортогональных положениях поляризационного анализатора может достигать нескольких сотен. Для лазеров с малым усилением (анизотропные резонаторы) квантовые и технические флуктуации практически не приводят к деполяризации излучения. Для лазеров, имеющих значительный коэффициент усиления активной среды, внешнее магнитное поле существенно влияет на характер поляризации.

Достаточно часто используют лазеры с изотропными резонаторами, при этом обеспечивается практически идеальная круговая поляризация выходного излучения, со степенью поляризованности, которая близка к единице. В многомодовых лазерах с изотропными резонаторами (или со слабой анизотропией) поляризация отдельных мод изменяется сложным образом в зависимости от изменения параметров лазеров, и для некоторых промыш-

ленных лазеров это служит причиной скачков и медленных изменений поляризации, а следовательно, значительной нестабильности оптической мощности в измерительном тракте, содержащем оптические элементы. Передача лазерного излучения по волоконным световодам круглого сечения приводит к деполяризации излучения за счёт возбуждения волноводных мод. В зависимости от качества световода длина, на которой происходит полная деполяризация излучения, изменяется от нескольких сантиметров до нескольких метров. Медицинские световоды с диаметром сердцевины 400–1000 мкм имеют малую длину деполяризации на уровне нескольких сантиметров.

Схема лабораторной установки показана на рис. 1.

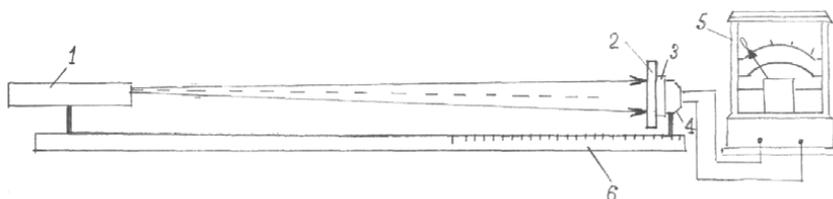


Рис. 1.

Лабораторная установка состоит из лазерной указки 1, поляризатора 2, помещенного в штатив, позволяющий его вращать вокруг оси лазерного пучка, снабженного устройством отсчета угла поворота 2 (микропозер), фильтра 3 с фотоприёмником 4, микроамперметра 5.

Все элементы экспериментальной установки расположены на одной оси и закреплены на оптическом рельсе 6.

*В работе определяется* степень поляризации лазерного излучения, основной параметр, характеризующий поляризацию оптического излучения.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 1, собирается установка.

2. На некотором расстоянии – 20–50 см – от лазера помещается штатив с поляризатором 2.

3. Включается лазер. Вращая поляризатор вокруг оси лазерного

пучка, фиксируется ток  $\mu A$  микроампера при различных углах поворота  $\varphi$  поляризатора.

4. По точкам в полярных координатах строится график зависимости  $I(\varphi)$ , где  $I$  – показания микроампер,  $\varphi$  – угол поворота поляризатора. Из графика (рис. 2) определяются величины  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ .

5. По формуле:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

вычисляется степень поляризации лазерного излучения.

В составе лабораторной установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку, фотоприемником может служить фотодиод ФД-256.

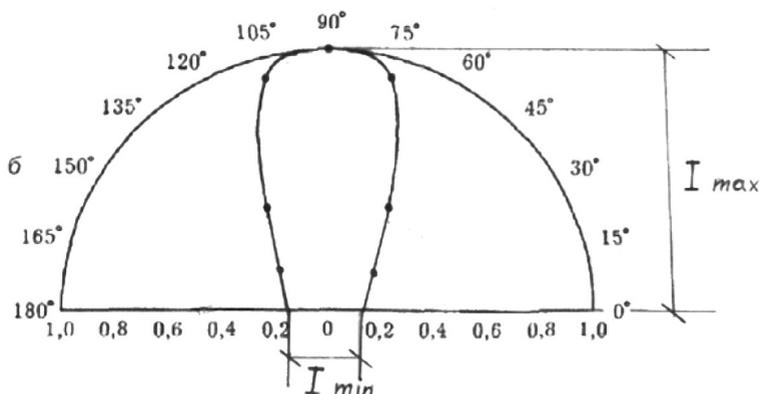


Рис. 2.

Качественную оценку степени поляризации лазерного излучения можно провести на установке, показанной на рис. 3. В этом случае проводится субъективная оценка интенсивности пятна лазерного излучения на экране при двух взаимно перпендикулярных положениях поляризатора.

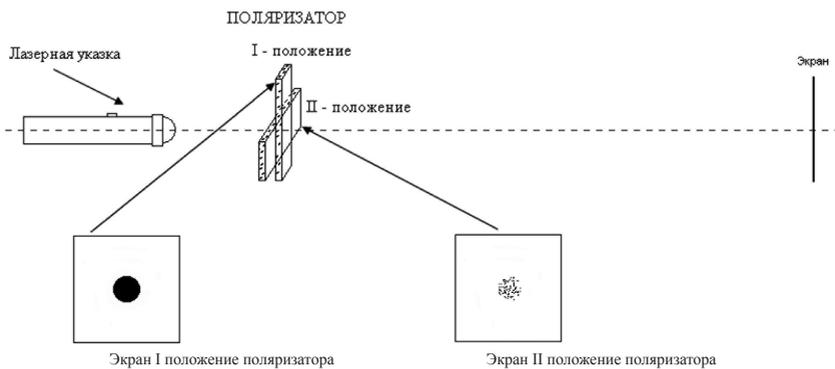


Рис. 3.

### Литература

1. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов / под ред. Р. А. Валитова. – М.: изд-во Госстандарта, 1990. – 184 с.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «МОНОХРОМАТИЧНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

*Лабораторная работа посвящена изучению монохроматичности лазерного излучения, которая связана с тем, что излучение лазера представляет собой резонансный, стимулированный процесс, вследствие чего спектр излучения лазера привязан к центру полосы частот больше, чем излучение, спонтанно испускаемое обычными источниками излучения.*

Как известно, спектральной шириной излучения характеризуют распределение излучения по длинам волн. Излучения могут быть однородными и сложными. Однородными считают излучения, занимающие очень узкий участок спектра частот. Сложные излучения представляют собой совокупность однородных излучений и могут иметь линейчатый, полосатый или сплошной спектр.

Линейчатый спектр характерен для одноатомных газов. Полосатый спектр наблюдается при излучении многоатомными молекулами газообразных и жидких веществ, а сплошной характерен для теплового излучения твердых и жидких тел. Нас интересует однородное излучение, потому что оно эквивалентно монохроматическому (одноцветному) излучению.

Для излучения лазеров характерен крайне узкий спектр излучения (он уже, чем линейчатый спектр газов).

Ширина полосатого спектра, т. е. ширина полосы частот теплового излучения газов (жидкостей), равна нескольким десяткам тысяч обратных сантиметров ( $\text{см}^{-1}$ , обратный сантиметр  $\text{см}^{-1}$  – единица частоты в оптике, равная числу колебаний, укладываемых в одном сантиметре пути света. Например, частота зеленого участка видимой области равна  $6 \cdot 10^{14}$  Гц или в обратных сантиметрах равна  $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ). Ширина линейчатого спектра излучения атомов газа обычно колеблется от 10 до  $0,1 \text{ см}^{-1}$ . Лазерное излучение имеет еще

более узкую полосу частот. Так, газовые лазеры генерируют излучение, частота которого измеряется миллионными долями обратного сантиметра. Таким образом, лазерное излучение можно вполне считать монохроматическим.

В монохроматичности излучения нет ничего удивительного. Такое излучение получали в лабораториях и до появления оптических квантовых генераторов с помощью монохроматоров, выделяющих из того или иного спектра теплового излучения узкую полосу частот. Однако при этом приходилось терять мощность излучения, тогда как лазер может генерировать огромную энергию излучения (сотни и тысячи джоулей) в очень узкой полосе частот.

Высокая степень монохроматичности лазерного излучения объясняется тем, что стимулированное излучение представляет собой резонансный процесс и вследствие этого привязано к центру полосы частот больше, чем излучение, спонтанно испускаемое обычными источниками излучения.

Из сказанного можно заключить, что оптический квантовый генератор излучает практически на одной фиксированной длине волны.

Как было отмечено выше, для лазеров характерен крайне узкий спектр излучения. Однако генерация в них происходит одновременно более чем на одной частоте, вследствие чего получается ряд узких спектральных линий, при этом следует рассматривать ширину полосы частот одной компоненты, обусловленной генерацией данного типа колебаний (модой).

Обычно в резонаторах, используемых в оптических квантовых генераторах, возбуждается много типов колебаний. Это связано с тем, что частотное расстояние между резонансами резонатора бывает гораздо меньше ширины контура усиления рабочего перехода. Ширина спектра излучения зависит от числа одновременно возбужденных мод резонатора. Очевидно, минимальная ширина получается, когда генерация происходит только на одной моде.

Выделение одного типа колебаний, а следовательно, получение узкого спектра излучения, необходимо, например, при использовании лазера в системах связи, где требуется минимум шума и высокая спектральная чистота излучения.

Генерация излучения в идеальном оптическом квантовом генераторе будет происходить, как показали теоретические расчеты,

в одномодовом режиме с шириной спектральной линии для гелий-неонового лазера, равной  $10^{-3}$  Гц [1]. Фактическая же монохроматичность в реальном лазере на несколько порядков хуже вследствие флуктуации механического характера, теплового ухода и изменений, обусловленных эффектами затягивания процесса генерации. Известно, что спектральная ширина линии генерации лазерного излучения гелий-неонового лазера достигает 2 Гц.

Задача теоретического определения монохроматичности, т. е. ширины спектра излучения лазера, является довольно сложной и в настоящее время полностью не решена. Спектральная ширина лазерного излучения большинством исследователей определяется опытным путем.

Идея построения лабораторной работы основана на зависимости ширины дифракционного максимума дифракционной картины, получаемой от дифракционной решетки при ее облучении источником света от ширины спектра его излучения (рис. 1).

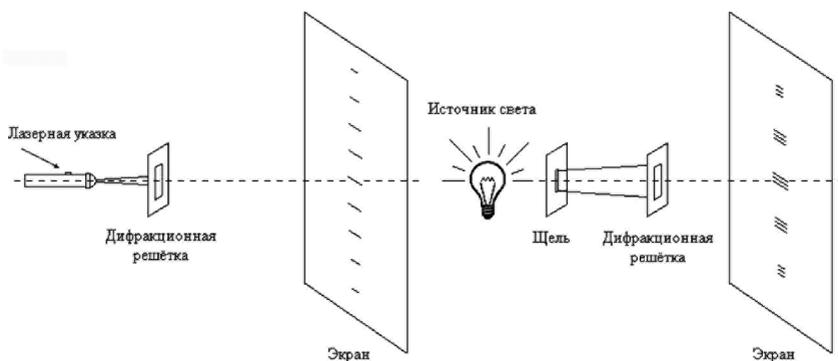


Рис. 1.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

В состав установки входят: источники оптического излучения 1; дифракционная решётка 3; фотоприемный блок 4 с микровольтметром 5 для регистрации сигнала; перемещающийся в горизонтальном направлении столик 7, снабженный измерительной шкалой величины перемещения, две линзы 2. Все элементы лабораторной установки размещены на оптической скамье 6 с помощью рейтеров 8.

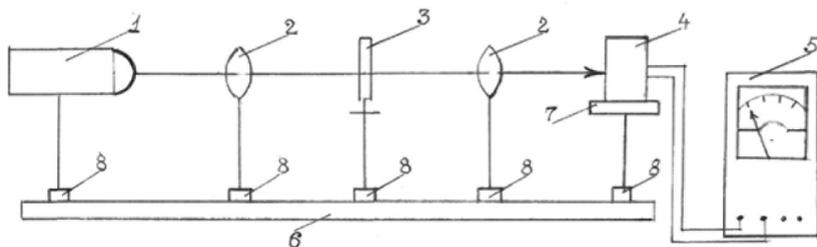


Рис. 2.

Поперечный разрез конструкции фотоприемного блока показан на рис. 3. Он состоит из фотодиода 1, светофильтра 2, щели 3. Все элементы фотоприемного блока помещены в корпусе 4, 5 – выводы фотодиода.

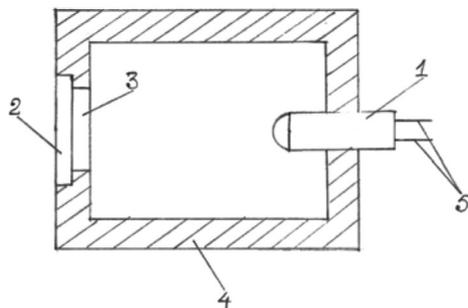


Рис. 3.

*В работе определяется* отношение ширины первого дифракционного максимума дифракционной картины при освещении дифракционной решеткой лазером к аналогичной величине при освещении дифракционной решетки лампой.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 2, собирается установка.

2. На некотором расстоянии – 5–6 см – от лазера помещается линза 2. Путем перемещения линзы по оптической оси установки добиваются, чтобы пучок света был квазипараллельным. Затем на расстоянии 4–5 см размещается дифракционная решетка 3. От нее на расстоянии 5–6 см размещается вторая линза. Фотоприемный

блок 4 размещается на таком расстоянии от дифракционной решетки, при котором на щели наблюдаются четкие линии дифракции.

3. Путем перемещения фотоприемного блока в горизонтальном направлении фиксируются величина перемещения и амплитуда сигнала на выходе фотодиода. По точкам строится график зависимости  $U = f(l)$ , где  $U$  – показания микровольтметра,  $l$  – положение фотоприемного блока. Из графика определяются величины  $U_l = 1/2U_{max}$ . Эта величина пропорциональна ширине дифракционного максимума, она и принимается за искомую ширину для лазерного источника света.

4. Лазерный источник света заменяется на лампу накаливания. Проводятся аналогичные п. 3 действия. По их результатам определяется искомая ширина дифракционного максимума для некогерентного источника света (лампы) –  $U_{лампы}$ .

5. Вычисляется величина

$$V = \frac{U_l}{U_{лампа}},$$

делается вывод.

В составе лабораторной установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку, фотоприемником может служить фотодиод ФД-256.

#### Литература

1. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов / под ред. Р. А. Валитова. – М.: изд-во Госстандарта, 1990. – 184 с.

#### 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ЯРКОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

*Лабораторная работа посвящена изучению яркости лазерного луча, уникальной характеристике лазеров, отличающей лазерные источники излучения от всех остальных источников излучения.*

Яркость – это поверхностно-пространственная плотность светового потока, исходящего от поверхности, равна отношению светового потока  $d\Phi$  к геометрическому фактору  $d\Omega dA \cos\Theta$ :

$$L = d\Phi / d\Omega dA \cos\Theta,$$

здесь  $d\Omega$  – заполненный излучением телесный угол,  $dA$  – площадь участка, испускающего или принимающего излучение,  $\Theta$  – угол между перпендикуляром к этому участку и направлением излучения.

Из общего определения яркости следуют два практически наиболее интересных частных определения:

1) яркость – это отношение силы света  $dI$  элемента поверхности к площади его проекции, перпендикулярной рассматриваемому направлению:

$$L = dI / dA \cos\Theta;$$

2) яркость – это отношение освещенности  $dE$  в точке плоскости, перпендикулярной направлению на источник, к элементарному телесному углу, в котором заключен поток, создающий эту освещенность:

$$L = dE / d\Omega \cos\Theta.$$

Яркость измеряется в  $\text{кд} \cdot \text{м}^2$  (нитах).

Из всех световых величин яркость наиболее непосредственно

связана со зрительными ощущениями, так как освещенности изображений этих предметов на сетчатке глаза пропорциональны яркости этих предметов.

В системе энергетических фотометрических величин аналогичная яркости величина называется энергетической яркостью и измеряется в  $\text{Вт}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{м}^2$ .

Для количественной характеристики различных источников света используется и коэффициент яркости – это отношение яркости тела в некоторой точке и в заданном направлении к яркости, при одинаковых условиях освещения, совершенного отражающего рассеивателя, то есть рассеивателя, яркость которого одинакова во всех направлениях, а коэффициент отражения равен 1. Понятие коэффициента яркости относится к излучению, оцениваемому как в энергетических, так и в световых единицах; обозначается соответственно  $\beta_e$ ,  $\beta_v$  (или в обоих случаях  $\beta$ ).

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

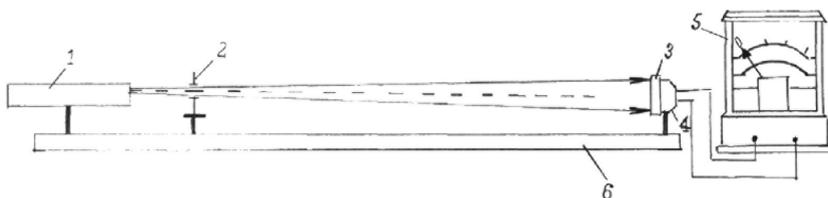


Рис. 1.

Лабораторная установка содержит источники света (лазер и лампа накаливания) 1; фотоприемник 4 излучения с исправляющими его спектральную чувствительность светофильтром 3 и ослабителями (П); диафрагму, установленную в плоскости изображения источника  $D$ ; габаритную диафрагм  $D_r$ ; микроамперметра 5;  $\beta$  – угловые размеры фотометрируемых пучков лучей (рис. 2).

Все элементы экспериментальной установки расположены на одной оси и закреплены на оптическом рельсе 6.

*В работе* сравнивается яркость лазера и некогерентного источника оптического излучения.

Порядок выполнения работы следующий:

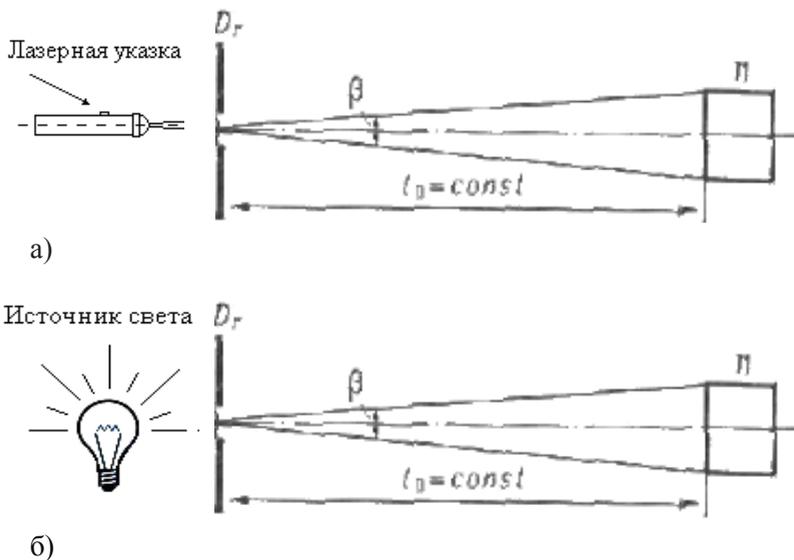


Рис. 2.

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 1, собирается установка.

2. На некотором расстоянии  $L_1$  ( $\sim 5 - 10$  см) от экрана 2 помещается лазер, на расстоянии  $L_2$  ( $\sim 30 - 40$  см) от экрана 2 располагается светофильтр 3 и фотоприемник 4 – П (рис. 2а).

3. Включается лазер. Фиксируется ток  $\mu\text{А}$  микроампера, это значение тока принимается за  $I_{\text{лазер}}$ .

4. Затем лазер заменяется на лампу накаливания, которая устанавливается на том же расстоянии  $L_1$  от диафрагмы 2. Лампа включается. Фиксируется ток  $\mu\text{А}$  микроампера, это значение тока принимается за  $I_{\text{лампа}}$ .

5. По формуле:

$$W = \frac{I_{\text{ЛАЗЕР}}}{I_{\text{ЛАМПА}}}$$

вычисляется относительная яркость лазера к лампе накаливания, делается вывод.

В составе лабораторной установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку, фотоприемником может служить фотодиод ФД-256. В качестве некогерентного источника оптического

излучения можно использовать лампу накаливания 12 В и любым источником питания, имеющим на выходе это напряжение.

*Примечание.*

В состав задания при выполнении лабораторной работы может быть включен эксперимент для не количественного сравнения яркости лазерного излучения и некогерентного источника излучения.

Схема экспериментальной установки для проведения этого эксперимента показана на рис. 3. В состав установки входят: лазерная указка 1; дифракционная решётка 2; экран 3; лампа накаливания 4; щель 5.

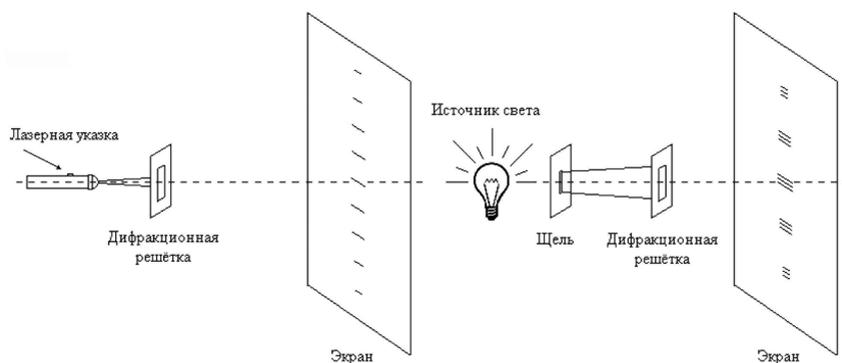


Рис. 3.

Ход работы этого задания следующий:

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки.
2. Осветить лазером дифракционную решётку и пронаблюдать на экране дифракционную картину. Подсчитывать количество дифракционных максимумов (ярких линий).
3. Осветить лазером дифракционную решётку лампой накаливания и пронаблюдать на экране дифракционную картину. Подсчитывать количество дифракционных максимумов (ярких полос).
4. Сравнить результаты наблюдений, сделать вывод.

Литература

1. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов / под ред. Р. А. Валитова. – М.: изд-во Госстандарта, 1990. – 184 с.

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «КОГЕРЕНТНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

*Лабораторная работа посвящена изучению когерентности лазерного излучения, важнейшей характеристике лазерного излучения, отличающей лазерное излучение от других видов излучений и обусловленной тем, что лазерное излучение возникает благодаря вынужденному излучению.*

Наряду с высокой интенсивностью и направленностью, в отличие от всех других источников света, лазерное излучение является когерентным.

Напряженность электрического и магнитного поля лазерного излучения изменяется по синусоидальному закону в зависимости от времени и расстояния. Определено, что чем выше монохроматичность излучения, тем больше интервал времени или пространства, в котором синусоидальный закон выполняется с точностью до фазы, значительно меньшей, чем  $\pi/4$ , т. е. максимумы и минимумы волн появляются с точностью, значительно превышающей четверть длины волны. Такие колебания называются когерентными. Таким образом, понятие когерентности (coherency – английское слово, означающее связь, согласованность между какими-либо явлениями, факторами или событиями) в применении к колебаниям относится к согласованности или связи между фазами колебания волн в различных точках пространства в один и тот же момент времени или между фазами колебаний в одной и той же точке в различные моменты времени. Математически эта связь или согласованность колебаний описывается с помощью корреляционных функций.

На примере твердотельного лазера можно пояснить, что в его объемном резонаторе формируются стоячие волны, причем все ионы хрома (рубиновый лазер), входящие в состав активного вещества этого лазера, являются отдельными генераторами колебаний, которые вынуждены генерировать излучение синхронно, т. е. одно-

временно. Их общее излучение приобретает некоторую упорядоченную регулярность в пространстве и во времени. Эта регулярность излучения называется когерентностью.

Существует два типа когерентности колебаний: временная и пространственная. Рассмотрим эти типы когерентности колебаний.

Идеальные электромагнитные колебания, если бы они были в природе, то представляли собой колебания точно на одной и той же частоте. В реальных условиях любой генератор электромагнитных колебаний, а в оптическом диапазоне атом (ион, молекула) испытывают отклонение частоты  $\nu$  на некоторую величину  $\Delta\nu$ . Интервал времени, в течение которого это отклонение не сменится другим отклонением частоты, определяется значением  $\Delta\nu = 1/\Delta t$  и называется временем когерентности. При  $\Delta\nu \rightarrow 0$   $\Delta t$  стремится к бесконечности.

За любой интервал времени, не превышающий  $\Delta t$ , излучение происходит на одной частоте без изменения фазы колебаний. Чем больше величина  $\Delta t$ , тем больше временная когерентность и строже выполняется фазовое соответствие между волнами, излучаемыми в разные моменты времени.

Пространственно когерентными считают источники, которые излучают колебания с одинаковыми фазами или с постоянной разностью фаз. Пространственная когерентность определяется корреляцией фаз излучения, выходящего из различных точек излучающего тела. В том случае, когда по всей площади поперечного сечения активной излучающей среды все атомы (ионы, молекулы) излучают в одной фазе, то фронт суммарной волны лучистой энергии приближается к фронту плоской волны.

Иногда когерентность излучения количественно определяется обобщенной функцией корреляции четырехмерного пространства. Вследствие того что функция корреляции определена в четырехмерном пространстве, она характеризует сразу временную и пространственную когерентность электромагнитного излучения.

Известно, что электромагнитное излучение представляет собой систему колебаний электрических и магнитных волн, для которых величина частот и направление излучения имеют одни и те же значения. Это свидетельствует о том, что спектр излучения заключен в узкой полосе частот, в центре которой размещается несущая, определяемая заданным значением частоты и направлением распространения данного излучения. Следовательно, понятие простран-

ственной когерентности можно заменить понятием поперечной когерентности, т. е. когерентности в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, а временная когерентность оказывается пропорциональной пространственной продольной когерентности.

Таким образом, если выходное излучение по форме близко к плоской волне, и все волновые фронты плоские и перпендикулярны направлению распространения излучения, то оно является пространственно-когерентным. Если же выходное излучение обладает высокой степенью монохроматичности, оно является когерентным и во времени, так как имеется строгое фазовое соответствие между частью волны, излучаемой в данный момент времени, и волной, излучаемой спустя некоторый момент времени. При точном соблюдении электромагнитным излучением заданной частоты более резко наблюдается свойство когерентности излучения во времени.

Чем же отличается излучение обычных некогерентных источников лучистой энергии (электрическая дуга, лампа накаливания, газовая горелка, солнце, ядерный взрыв) от когерентных?

Излучение некогерентных источников является результатом генерации колебаний огромного множества атомов (ионов, молекул). При этом фаза, частота и амплитуда колебаний, соответствующие излучениям отдельных атомов, хаотически меняются с очень большой скоростью по случайному закону. Каждый атом, ион и молекула излучают независимо друг от друга, и излучение их начинается в различные моменты времени. Излучение обычного источника света более похоже на статистический шум, чем на излучение какой-то определенной частоты. Такое излучение не является когерентным.

Колебания некогерентных источников нельзя преобразовать, т. е. нельзя, например, применить частотную или фазовую модуляцию для передачи информации, принципиально нельзя осуществлять супергетеродинный прием таких излучений и т. д. Такие некогерентные излучения годятся лишь для осуществления примитивной световой сигнализации.

Совершенно иными свойствами характеризуется излучение лазера. Оно создается одновременным излучением множества атомов. Но при этом сосредоточенная в оптическом резонаторе энергия лазерного излучения генерируется таким образом, что вновь возникающее излучение оказывается в фазе с уже распространившимся

в пространстве. Стимулированное излучение в резонаторе лазера объединяет возникающие в разное время моменты излучения, так что выходное излучение определяется как когерентное.

Таким образом, пространственная когерентность волн обеспечивает получение концентрации энергии в поперечном сечении лазерного луча, а временная когерентность позволяет все преимущества монохроматического лазерного излучения использовать для передачи информации с помощью передающих и приемных устройств систем лазерной связи [1].

Благодаря свойству пространственной когерентности лазерного излучения возможно создать высокоэффективные мощные лазерные устройства с огромной выходной мощностью излучения. Лазерное излучение, обладающее свойством когерентности, теоретически может быть сфокусировано в пятно диаметром, равным длине волны, генерируемой лазером, при этом происходит колоссальная концентрация энергии излучения.

Излучение же обычного источника света сфокусировать можно только до величины размеров излучающего тела, при этом уровень концентрации энергии значительно снижается.

Лазерное излучение может быть сконцентрировано с помощью оптических систем в изображение, яркость которого больше яркости первоначального излучения. Лазерное излучение в виде плоской волны, имеющее пространственную и временную когерентность, можно направить на большое расстояние с очень малыми потерями, в то время как обычные источники излучения этой способностью не обладают.

Лучеиспускание лазера  $E_K$  в огромное число раз больше лучеиспускания  $E_H$  обычного источника света [1]. Эти величины связаны соотношением:

$$\frac{E_K}{E_H} = \frac{10^{35} P Q}{v^2},$$

где  $P$  – выходная мощность излучения лазера;  $Q$  – добротность объемного оптического резонатора лазера на частоте  $v$ ;  $v$  – частота генерации лазера.

Рассчитаем это отношение для лазера, имеющего следующие данные:  $P = 1$  Вт;  $v = 5 \cdot 10^{14}$  Гц ( $\lambda = 0,63$  мкм);  $Q = 10^{10}$ .

В результате расчетов находим, что отношение  $E_k : E_n = 4 - 10^{15}$ .  
 Отношение  $E_k : E_n$  с возрастанием частоты уменьшается пропорционально  $\nu^{+2}$ .

Найдем, при каких условиях отношение  $E_k : E_n$  будет равно единице. Это произойдет тогда, когда частота генерации лазера достигнет  $10^{22} - 10^{23}$  Гц (область космических лучей).

В основу проведения эксперимента по данной лабораторной работе положен опыт Юнга, в котором излучение от исследуемого источника подается на экран с двумя щелями и на следующем экране, расположенном дальше по ходу лучей, наблюдается интерференционная картина (рис. 1).

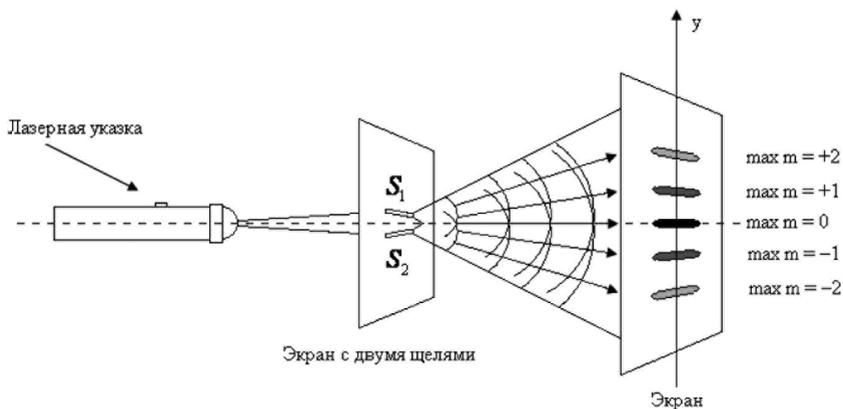


Рис. 1.

Схема лабораторной установки показана на рис. 2.

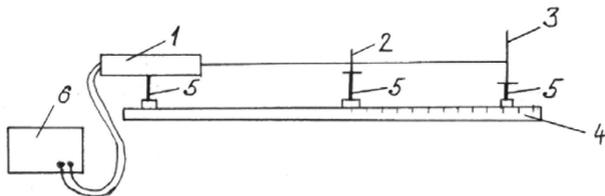


Рис. 2.

Установка состоит из исследуемого лазера 1, экрана с двумя щелями 2 и экрана для наблюдения интерференционной картины

3. Все элементы лабораторной установки размещены с помощью рейтеров 5 на оптической скамье 4, снабженной измерительной шкалой. Электропитание лазера обеспечивается источником питания 6.

Фронтальный вид экрана 2 показан на рис. 3.

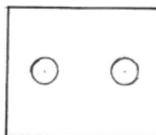


Рис. 3.

*В работе определяется* длина когерентности исследуемого лазера.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 2, собирается установка.

2. На некотором расстоянии – 3–5 см – от лазера 1 размещается экран 2. Экран 3 размещается вплотную к экрану 2.

3. Включается лазер. Экран 3 перемещается по направлению хода лазерного пучка. Фиксируется расстояние между экранами 2 и 3, при котором исчезает интерференционная картина на экране 3. Измерение проводится несколько раз, вычисляется среднее значение найденного расстояния, которое и принимается за длину когерентности исследуемого лазера.

В составе лабораторной установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку и любые источники питания, имеющие на выходе это напряжение для ее электропитания.

*Примечание.*

В состав задания при выполнении лабораторной работы может быть включен эксперимент по сравнению размера когерентности лазерного излучения и излучения от некогерентного источника излучения.

Схема экспериментальной установки для проведения этого эксперимента та же, но в экспериментах используется наряду с лазером еще и лампа накаливания.

Порядок выполнения этого задания следующий:

1. После определения длины когерентности исследуемого лазера лазер заменяется лампой накаливания.

2. По той же методике определяется длина когерентности лампового источника света.

3. Вычисляется отношение:

$$Q = \frac{L_1}{L_2},$$

где  $L_1$  – длина когерентности лазера,  $L_2$  – длина когерентности лампового источника света (некогерентного источника света).

4. По результатам вычислений делают вывод.

#### Литература

1. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов / под ред. Р. А. Валитова. – М.: изд-во Госстандарта, 1990. – 184 с.

## **6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОИЗЛУЧАТЕЛЕЙ»**

*Лабораторная работа посвящена изучению важной характеристики полупроводниковых лазеров – диаграммы направленности, в частности определяющей тот объем энергии, который может быть передан от них в световод.*

Одной из характеристик полупроводниковых светоизлучателей является диаграмма направленности – распределение мощности излучения в различных направлениях. В зависимости от области применения к светодиодам предъявляются различные требования, в том числе и связанные с диаграммой направленности [1–4].

Например, при использовании светодиодов в качестве сигнальных индикаторов необходима широкая диаграмма направленности (угол излучения, как правило, должен превышать  $50^\circ$ ). При использовании светодиодов в качестве подсветки допускается сужение диаграммы направленности (угол излучения в пределах  $5\text{--}25^\circ$ ) [1–3].

Полупроводниковый лазер состоит из кристалла полупроводника с электронно-дырочным переходом с омическими контактами, с нанесенными на электронно-дырочный переход зеркалами и элементов конструкции, предназначенных для сбора излучения, улучшения внешней оптической эффективности, улучшения восприятия свечения. Таким образом, полупроводниковый лазер – прибор, в котором осуществляется не только генерация света, но и перераспределение его в пространстве [2].

Получить диаграмму направленности полупроводникового лазера можно с помощью установки, схема которой изображена на рис. 1.

*Схема лабораторной установки показана на рис. 1.*

На неподвижной опоре 4 укреплен светодиод, центр которого находится на оси, вокруг которой поворачивается подвижная рейка 3 с укрепленным на ней фотодиодом 2. Напряжение на фотодиоде, возникающее при попадании на него исследуемого лазерного излучения, регистрируется милливольтметром  $mV$ , оно прямо пропорционально мощности излучения, падающего на фотодиод. При повороте фотодиода вокруг оси, проходящей через центр светодиода, показания милливольтметра будут изменяться пропорционально мощности излучаемой исследуемого лазера в данном направлении. Таким образом, при изменении угла поворота исследуемого лазера относительно фотодиода возникает возможность построения диаграммы направленности его излучения. При построении диаграммы направленности в полярных координатах удобно в качестве значений мощности, излучаемой в различных направлениях, использовать не абсолютные значения, а относительные.

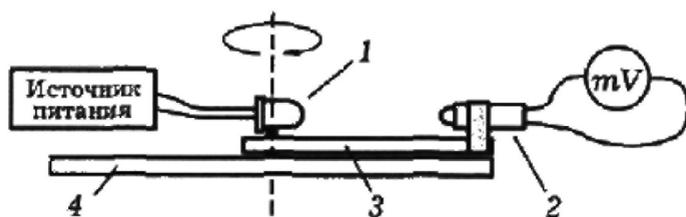


Рис. 1.

В работе исследуется диаграмма направленности излучения полупроводникового лазера в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Ход выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 1, собирается установка.

2. Исследуемый лазер устанавливается напротив фотодиода, что соответствует показанию  $90^\circ$  на круговой шкале углов поворота. Лазер включается, фиксируется показание милливольтметра.

3. Плавно вращая фотодиод относительно оси вращения, фиксируются показания милливольтметра в выбранных контрольных точках угла поворота.

4. По полученным в ходе измерения данным строится диаграм-

ма направленности исследуемого лазера. Один из возможных вариантов такой диаграммы показан на рис. 2а.

5. Исследуемый лазер 1 разворачивается на  $90^\circ$  относительно своей оси и вновь выполняются п. 2, 3. По полученным данным вновь строится диаграмма направленности исследуемого лазера, которая соответствует его диаграмме направленности в плоскости, перпендикулярной той, что получена в п. 4. Один из возможных вариантов этой диаграммы показан на рис. 2б.

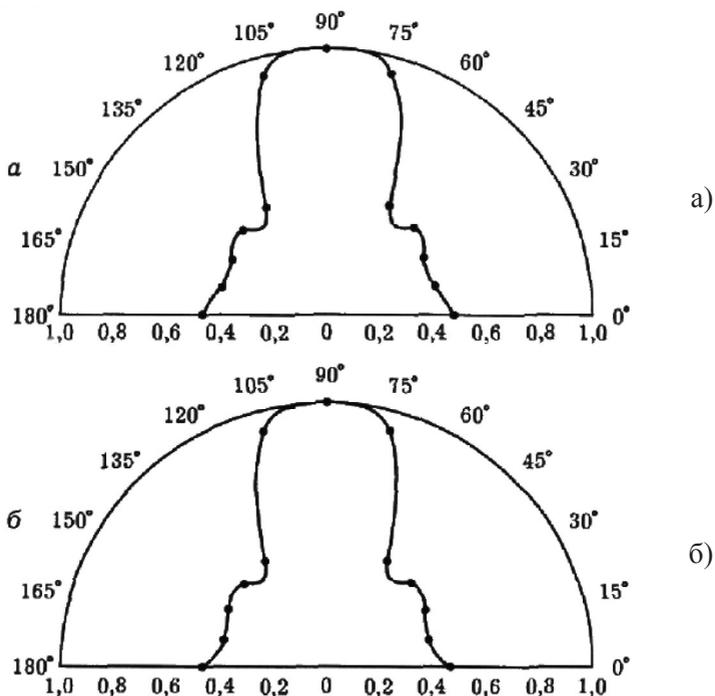


Рис. 2.

Лабораторная работа должна проводиться в затемненном помещении для устранения влияния внешнего освещения. В данной лабораторной работе для регистрации мощности излучения удобнее использовать значения напряжения фотодиода, так как значения создаваемого им тока находятся в пределах нескольких десятков микроампер.

В составе лабораторной установки в качестве светочувствительного элемента использовался фотодиод ФД-256, имеющий достаточно малые габариты и высокую чувствительность, что позволяет получить более качественные результаты. В качестве светочувствительного элемента возможно использование и других устройств, например ФЭУ или фотоэлементов.

Диаграммы направленности излучения, изображенные на рис. 2, были получены при исследовании полупроводникового лазера с синим цветом с большой площадью излучающей поверхности [5].

#### Литература

1. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1983.

2. Коган Л. М. Светоизлучающие диоды / Л. М. Коган // Электронная техника. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1980. – Вып. 3 (138). – С. 100–111.

3. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Ннсихара, К. Кюма, К. Хататэ; под ред. Т. Окоси: пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.

4. Коган Л. М. Светоизлучающие диоды с управляемым цветом свечения / Л. М. Коган, Б. И. Вишневская, С. М. Ковыкин [и др.] // Электронная техника. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1980. – Вып. 3 (138). – С. 112-116.

5. Кирин И. Г. Изучение диаграммы направленности светодиодов / И. Г. Кирин, М. И. Кирина, А. В. Репьев // Учебная физика. – 2008. – № 2. – С. 85–88.

## 7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ВАТТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ»

*Лабораторная работа посвящена изучению важной характеристики полупроводниковых излучателей – ватт-амперной характеристики, являющейся одной из основных характеристик этих лазеров.*

Одним из важных параметров полупроводниковых излучателей является характер зависимости мощности излучения от силы пропускаемого через светодиод тока, то есть ватт-амперная характеристика [1–3].

Принципиальная схема установки для изучения этой характеристики изображена на рис. 1.

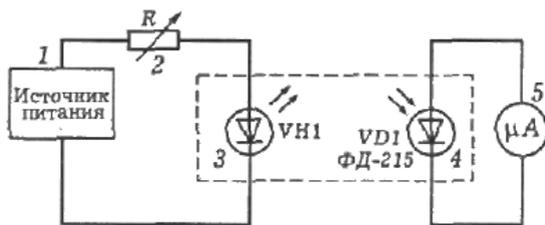


Рис. 1.

Так как работа полупроводниковых светоизлучающих структур, исходя из принципов действия, регулируется значениями пропускаемого тока, то в качестве источника питания необходимо использовать регулируемый источник постоянного тока. При отсутствии источника со стабилизатором тока, позволяющим менять значение тока, возможно использование источника стабилизированного напряжения вместе с реостатом, имеющим сопротивление, значитель-

но большее сопротивления светодиода или лазера. В результате ток в данной цепи, то есть ток через светодиод, будет зависеть от сопротивления реостата.

В таком случае источник постоянного напряжения должен обладать достаточной мощностью, то есть обеспечивать малое изменение напряжения в заданном диапазоне изменения тока. В данном случае использовался диапазон изменения тока через светодиод от 0 до 100 мА. В этом случае светодиод 3 подключается последовательно с магазином сопротивлений 2 к источнику постоянного напряжения (ИЭПП-2). Ток, протекающий через светодиод или лазер, можно вычислить по элементарной формуле:

$$I_{\text{св}} = \frac{U}{R+r}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{св}}$  – сила тока, проходящего через светодиод,  $U$  – напряжение источника питания,  $R$  – значение сопротивления магазина сопротивлений,  $r$  – сопротивление светодиода. При условии, что  $I_{\text{св}}$  достаточно мал, а  $R > r$ , формула принимает очень простой вид:

$$I_{\text{св}} = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

Устанавливая различные значения сопротивления, можно регулировать силу тока, проходящего через светодиод или лазер. Изменению проходящего тока будет соответствовать изменение мощности излучения.

Для регистрации мощности излучения служит фотодиод 4, который подключен к микроамперметру 5. Исходя из формулы, описывающей ток фотодиода [2]:

$$I_{\text{ф}} = \frac{e\eta P_0}{h\nu}, \quad (3)$$

ток фотодиода будет прямо пропорционален мощности излучаемого светодиодом или лазером света. Таким образом, изменяя значение сопротивления  $R$ , можно, снимая показания микроамперметра, построить кривую зависимости мощности излучения светодиода или лазера от пропускаемого через него тока.

Светодиод или лазер, используемый в лабораторной работе, должен быть как можно более мощным. Фотодиод, используемый в данной лабораторной работе, должен обладать хорошей чувствительностью в том участке спектра, в котором излучает выбранный светодиод или лазер. Используемый в работе микроамперметр должен обеспечивать возможность измерения тока, даваемого фотодиодом.

Схема лабораторной установки показана на рис. 2.

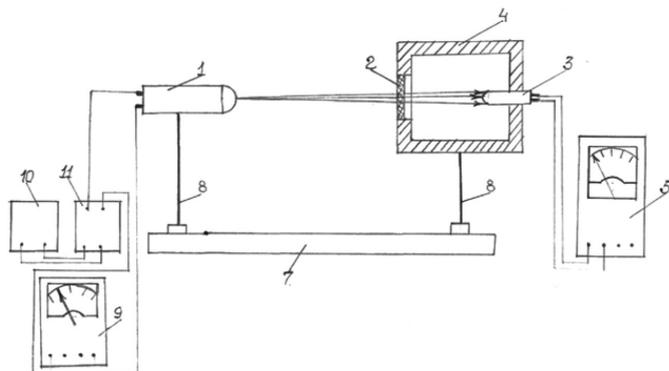


Рис. 2.

Лабораторная установка состоит из исследуемого светодиода или лазера 1, фильтра 2 с фотоприёмником 3, размещенных на оптической скамье 8 с помощью держателей 9 на одной оптической оси. Электрический ток, пропорциональный мощности исследуемого светодиода или лазера, фиксируется микроамперметром 5. Электропитание исследуемого лазера осуществляется источником питания 10 через магазин сопротивлений 11. Регистрация тока, проходящего через исследуемый лазер, обеспечивается миллиамперметром 9.

*В работе определяется* зависимость мощности излучения исследуемого лазера или светодиода от величины питающего его тока.

Ход выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 2, собирается установка.

2. Исследуемый светодиод или лазер и фотодиод устанавливаются на одной оптической оси на расстоянии 8–10 см друг от друга.

3. На магазин сопротивлений 11 устанавливаются сопротивление, превосходящее сопротивление исследуемого светодиода или лазера примерно в 10 раз, и нулевое значение тока на источники питания 10.

4. Включаются источники питания, фиксируются при изменении напряжения ток, проходящий через исследуемый лазер, и ток на выходе фотодиода. Включается, фиксируется показание милливольтметра.

5. По полученным данным строится график зависимости  $I_{\phi} = f(I_{л})$ , где  $I_{\phi}$  – величина тока фотодиода пропорциональная мощности излучения исследуемого светодиода или лазера,  $I_{л}$  – величина тока, проходящего через исследуемый лазер.

Лабораторная работа должна проводиться в затемненном помещении для устранения влияния внешнего освещения. В данной лабораторной работе для регистрации мощности излучения удобнее использовать значения напряжения фотодиода, так как значения создаваемого им тока находятся в пределах нескольких десятков микроампер.

В работе в качестве источника тока можно использовать источник питания типа ИЭПП-2. В качестве регистрирующего фотодиода – ФД-216. Измерительным прибором служил микроамперметр, позволяющий измерять токи от 1 до 50 мкА. В качестве светочувствительного элемента возможно использование и других устройств, например ФЭУ или фотоэлементов. Главные условия – небольшие размеры и высокая чувствительность. В качестве сопротивления был использован магазин сопротивлений, позволяющий точно регулировать значения тока. Сопротивлением может служить реостат. В таком случае в цепь необходимо включить микроамперметр, способный регистрировать ток в соответствующем диапазоне. В качестве светоизлучающего элемента возможно использовать и другие устройства, например инжекционный полупроводниковый лазер, лазерную указку. Большая мощность светоизлучающего элемента и более высокая чувствительность светоприемника и индикатора позволяют увеличить расстояние между светоизлучающим и светоприемным устройством, что повышает качество результатов измерения. Для этой лабораторной работы не важен размер светоприемника, что упрощает подбор компонентов.

Ватт-амперная характеристика, изображенная на рис. 3, была получена при исследовании полупроводникового светофотодиода с синим цветом с большой площадью излучающей поверхности [5].

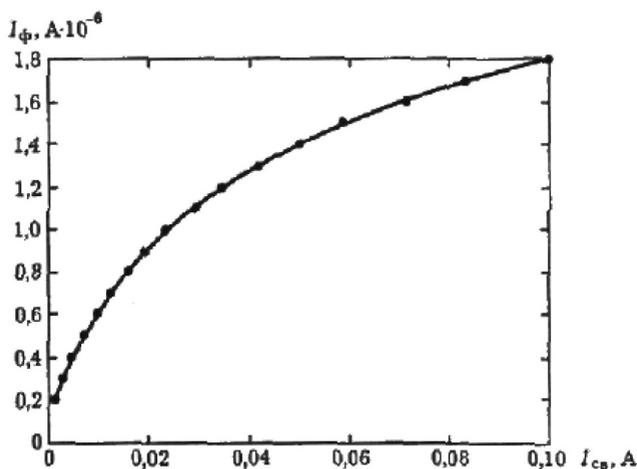


Рис. 3.

Простота и доступность используемого в лабораторной работе оборудования, наглядность получаемых результатов дают широкие возможности их дальнейшей модернизации [4].

#### Литература

1. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Коган Л. М. Светоизлучающие диоды / Л. М. Коган // Электронная техника. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1980. – Вып. 3 (138). – С. 100–111.
3. Коган Л. М. Светоизлучающие диоды с управляемым цветом свечения / Л. М. Коган, Б. И. Вишневская, С. М. Ковыкин [и др.] // Электронная техника. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1980. – Вып. 3(138). – С. 112–116.
4. Кирин И. Г. Изучение ватт-амперной характеристики светодиодов / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук // Учебная физика. – 2008. – № 1. – С. 103–105.

## 8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ЛАЗЕРНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ»

*Лабораторная работа посвящена изучению лазерных линий связи – современных линий передачи информации, область применения которых все время расширяется.*

Лазерные линии связи широко используются в системах развязки на узлах волоконно-оптических линий связи, для передачи информации между космическими объектами, при организации оперативных каналов связи для передачи информации с объектов, находящихся под высоким напряжением [1–4].

Как правило, лазерные линии связи включают: передатчик, состоящий из лазера и модулятора, и приемник, содержащий фотоприемник и демодулятор [1].

Среди лазерных линий связи различного назначения особое место занимают специальные лазерные линии связи, предназначенные для передачи информации с высоковольтных платформ, расположенных в зонах с радиоактивным излучением, например с инжекторов ускорителей. В передатчиках таких лазерных линий связи используются только радиационно-устойчивые элементы и, прежде всего, полупроводниковые лазеры и пьезоэлектрические или электромеханические модуляторы. Схема разработанной лабораторной установки такого типа лазерной линии связи показана на рис. 1.

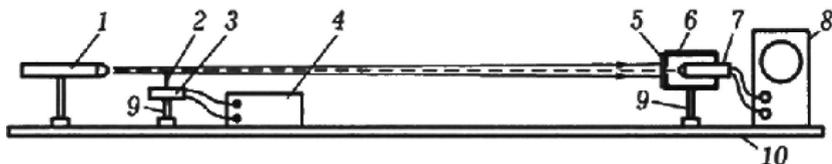


Рис. 1.

Передатчик лабораторной установки включает лазер 1, электро-механический модулятор, состоящий из шторки 2 размером  $1 \times 0,4 \times 0,1$  см с приводом 3. Модулятор подключен к генератору синусоидальных колебаний 4. Приемник установки состоит из красного светофильтра 5, корпуса 6 и находящегося в нем фотодиода 7, который соединен с осциллографом 8 для регистрации сигнала. Передатчик и приемник закреплены в рейтерах 9 оптической скамьи 10. В установке напряжение от источника передаваемого сигнала – учебного генератора синусоидальных колебаний – подается на электро-механический модулятор. Перемещение мембраны и шторки модулятора приводит к модуляции передаваемого лазерного излучения, и на выходе фотодиода возникает сигнал, повторяющий передаваемый.

В работе исследуются амплитудно-частотная характеристика лазерной линии связи и зависимость амплитуды сигнала на ее выходе от расстояния между ее передающей (выход лазерной указки) и приемной частями (вход фотодиода) и зависимость амплитуды сигнала на ее выходе частоты.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 1, собирается установка.

2. Лазер и фотодиод устанавливаются на одной оптической оси на расстоянии 100–150 см друг от друга.

3. Включается лазер, регистратор сигнала фотоприемника переводится в режим регистрации постоянного сигнала. Фиксируется величина сигнала принимаемого осциллографом. Устанавливается модулятор, путем перемещения модулятора по высоте добиваются такого положения, при котором уровень фиксируемого осциллографом постоянного сигнала уменьшился в два раза.

4. Включается генератор синусоидальных колебаний, осциллограф переводится в режим регистрации переменного сигнала, фиксируется амплитуда тока, принимаемого осциллографом сигнала, возникающего на выходе фотодиода при различных значениях частоты, устанавливаемой на звуковом генераторе. По полученным данным строится график зависимости  $I_{\text{отн ед}} = f(\nu)$ , где  $I_{\text{отн ед}}$  – относительная величина тока фотодиода, пропорциональная мощности излучения исследуемого лазера,  $\nu$  – частота сигнала генератора, представляющая собой амплитудно-частотную характеристику исследуемой лазерной линии связи.

5. По полученной амплитудно-частотной характеристики определяется частота ее максимума.

Эта частота устанавливается на генераторе. Последовательно увеличивается расстояние между лазером и приемным блоком. Фиксируется амплитуда тока, принимаемого осциллографом сигнала, возникающего на выходе фотодиода при различных значениях расстояния между лазером и приемным блоком установки. По полученным данным строится график зависимости  $I_{\text{отн. ед.}} = f(l)$ , где  $I_{\text{отн. ед.}}$  – величина тока фотодиода, пропорциональная мощности излучения исследуемого лазера,  $l$  – расстояние между лазером и приемным блоком установки.

Лабораторная работа должна проводиться в затемненном помещении для устранения влияния внешнего освещения. В данной лабораторной работе для регистрации мощности излучения удобнее использовать значения напряжения фотодиода, так как значения создаваемого им тока находятся в пределах нескольких десятков микроампер.

В составе установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку, электропитание которой можно обеспечить зарядным устройством Samsung для сотовых телефонов. Электромеханический модулятор можно изготовить из телефона ТОН-2А, на мембрану которого наклеивается шторка размером  $1 \times 0,4 \times 0,1$  см. В качестве источника электропитания модулятора может быть использован учебный генератор синусоидальных колебаний ГЗМ. В составе приемного блока в качестве фотоприемника может быть использован фотодиод ФД-256, для регистрации сигнала фотодиода можно использовать осциллограф С1-94.

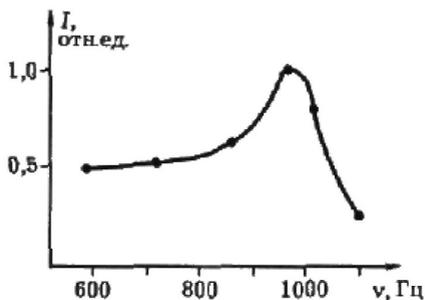


Рис. 2.

Амплитудно-частотная характеристика созданной лабораторной установки представлена на рис. 2. На рис. 3 показана зависимость амплитуды сигнала на ее выходе от расстояния между ее передающей (выход лазерной указки) и приемной частями (вход фотодиода).

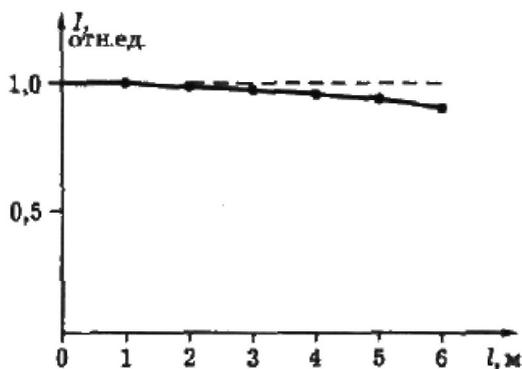


Рис. 3.

#### Литература

1. Гауэр Д. Оптические системы связи / Д. Гауэр. – М., 1989. – 243 с.
2. Серопегин В. И. Беспроводные системы передачи данных локального, городского и регионального масштабов / В. И. Серопегин // Технология и средства связи. – 1999. – № 4. – С. 72–77.
3. Гиносян Ю. А. Новые технологии беспроводного доступа / Ю. А. Гиносян // Технология и средства связи. – 1999. – № 4. – С. 38–39.
4. Клоков А. В. Беспроводные ИК-технологии, истинное качество «последней мили» / А. В. Клоков // Технология и средства связи. – 1999. – № 5. – С. 40–44.

## 9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ ОБЪЕКТА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ»

*Лабораторная работа посвящена изучению освещенности различных объектов, создаваемых с использованием лазеров, характеристики взаимодействия лазерного излучения с различными объектами, определяющей, в частности, процессы, протекающие при облучении лазерным излучением различных материалов.*

Принцип построения лабораторной работы изображен на рис. 1, на которой излучение лазера 1 в виде лазерного пучка 2 попадает на люксметр 3, установленный в месте расположения предполагаемого объекта облучения, с помощью которого и измеряется величина предполагаемой освещенности.

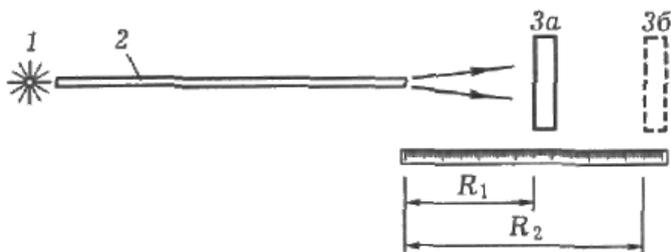


Рис. 1.

Кроме того, в том случае, если использован маломощный лазер, имеющий незначительный диаметр пучка на выходе, этот источник с очень хорошей точностью можно считать точечным. Это дает возможность проверить выполнимость закона освещенности для используемого типа лазера, что представляет значительный интерес при конструировании и расчете широкого круга различного технологического и медицинского лазерного оборудования.

Схема лабораторной установки показана на рис. 2.

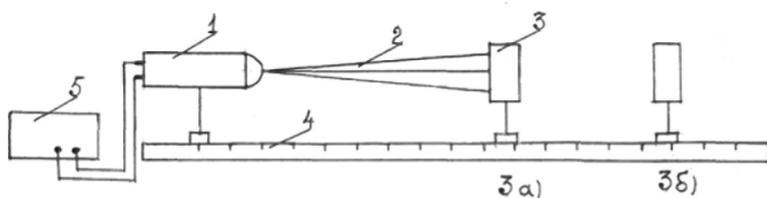


Рис. 2.

Лабораторная установка состоит из лазера 1, пучок излучения которого 2 попадает на люксметр 3. Лазер и люксметр размещены на оптической скамье 4, снабженной измерительной шкалой. Питание лазера осуществляется от источника 5.

С той целью в работе измеряется освещенность, создаваемой лазером в двух точках, расположенных на некотором расстоянии друг от друга путем перемещения люксметра из положения 3а в положение 3б с использованием соотношения  $E = I / R^2$  [1-4], где  $R$  – расстояние от лазера до люксметра (для расположения люксметра в положении 3а расстояние равно  $R_1$ , 3б –  $R_2$ ).

*В работе определяются* величина освещенности в области предполагаемого размещения объекта освещения и средняя ошибка аппроксимации изучаемого лазерного источника точечным источником света.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 2, собирается установка.

2. Лазер и люксметр устанавливается на одной оптической оси на расстоянии 50–70 см друг от друга.

3. Включается лазер и люксметр, фиксируются показания люксметра и расстояние от места расположения лазера и люксметра. Измерения проводятся несколько раз, вычисляется среднее значение освещенности создаваемого лазером в месте расположения люксметра, которое и принимается за искомую величину освещенности, создаваемой лазером на зафиксированном расстоянии от места его расположения.

4. Последовательно увеличивая расстояние между лазером и люксметром, проводят измерения по пункту 3.

Полученные данные заносят в таблицу

Освещенность, $E_i$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$	$E_{10}$
Расстояние между лазером и люксметром, $R_i$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$

5. По п. 4 рассчитываются величины:

$$E_i / E_{i+1} = R_i^2 / R_{i+1}^2 \quad (3)$$

6. По формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \frac{|E_i / E_{i+1} - R_i^2 / R_{i+1}^2|}{E_i / E_{i+1}} \cdot 100\% \quad (4)$$

рассчитывается средняя ошибка аппроксимации исследуемого лазера точечным источником света.

7. По полученным данным строится график зависимости  $E = f(R^2)$ , где  $E$  – освещенность,  $R$  – расстояние между лазером и люксметром.

Лабораторная работа должна проводиться в затемненном помещении для устранения влияния внешнего освещения.

В данной лабораторной работе для регистрации мощности излучения удобнее использовать значения напряжения фотодиода, так как значения создаваемого им тока находятся в пределах нескольких десятков микроампер.

В составе установки в качестве лазера можно использовать лазерную указку, электропитание которой можно обеспечить зарядным устройством Samsung для сотовых телефонов. В качестве люксметра можно использовать школьный люксметр ЛШ-1.

Экспериментальные результаты, полученные на установке, построенной на основе этих приборов, представлены в таблице и на рис. 3.

№	$E, \text{лк}$	$R, \text{лк}$	$E_i / E_{i+1}$	$R^2_i / R^2_{i+1}$
1	60	0,03	1,33	1,36
2	45	0,035	1,5	1,51
3	30	0,043	1,5	1,52
4	20	0,053	2	2,06
5	10	0,08		

В таблице в столбце 2 содержатся измеренные значения освещенности на расстоянии  $R$  от выходного торца лазера; в столбце 3 – расстояния от выходного торца лазера до люксметра; в столбце 4 – отношения освещенностей на разных расстояниях от выходного торца лазера; в столбце 5 – отношения квадратов расстояний от выходного торца световода [5].

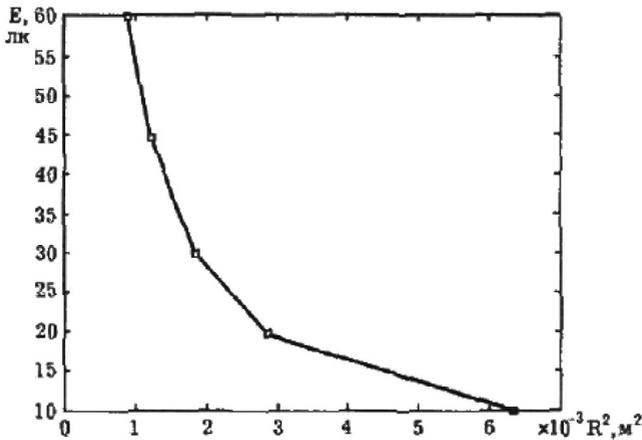


Рис. 3.

Видно, что

$$\max \frac{|E_1 / E_2 - R_2^2 / R_1^2|}{E_1 / E_2} \cdot 100\% = 12\% .$$

Работа достаточно проста, не требует настройки.

## Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976.
2. Гуртов В. А. Оптоэлектроника и волоконная оптика / В. А. Гуртов // Учебное пособие. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2005.
3. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов / В. Н. Чуриловский. – Л. : Машиностроение, 1966.
4. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем / Г. Г. Слюсарев. – Л. : Машиностроение, 1975. – 640 с.
5. Кирин И. Г. Лабораторная работа по определению освещенности объекта световодом и проверке закона освещенности / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук, С. Ф. Гумарова // Учебная физика. 2008. – № 2. – С. 78–80.

## 10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ОТРАЖЕННОГО ОТ ОБЪЕКТА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

*Лабораторная работа посвящена изучению диаграммы направленности отраженного от объекта света, освещаемого с помощью лазеров, – важной характеристики взаимодействия лазерного излучения с различными материалами.*

Описывается лабораторная работа, позволяющая изучать диаграммы рассеяния отраженного света от объектов исследования изготовленных из различных материалов.

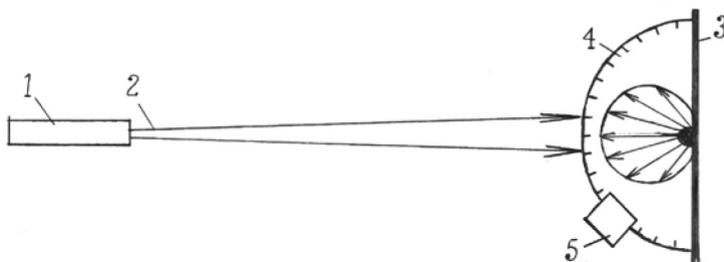


Рис. 1.

Принцип построения лабораторной работы изображен на рис. 1. Излучение лазера 1, в виде лазерного пучка 2 попадает на экран, изготовленный из исследуемого материала. Возникающее при отражении излучение фиксируется приемником оптического излучения 5. Исследование с диаграммы направленности отраженного от исследуемого объекта лазерного излучения проводится следующим образом: лазерное излучение, отражаясь от объекта исследования, образует диаграмму рассеивания, регистрируется с помощью светочувствительного элемента. Проводится измере-

ние интенсивности лазерного излучения, отраженного под разными углами к экрану от исследуемого объекта путем перемещения приемника по шкале с делениями 4. Угол измеряется с помощью шкалы с делениями (транспортир). В процессе измерения одновременно фиксируются угол между оптической осью лазерного пучка и фототок фотоприемника, который пропорционален интенсивности отраженного в данном направлении лазерного излучения. Далее свет, отражаясь от объекта, регистрируется с помощью светочувствительного элемента. Измерение отраженного от предмета света производят под разными углами к экрану. Угол измеряется с помощью шкалы с делениями (транспортир). По полученным данным строится полярная диаграмма, которая и представляет собой диаграмму направленности отраженного от исследуемого объекта лазерного излучения [1-3].

Схема разработанной лабораторной установки лазерной установки показана на рис. 2 (вид сверху).

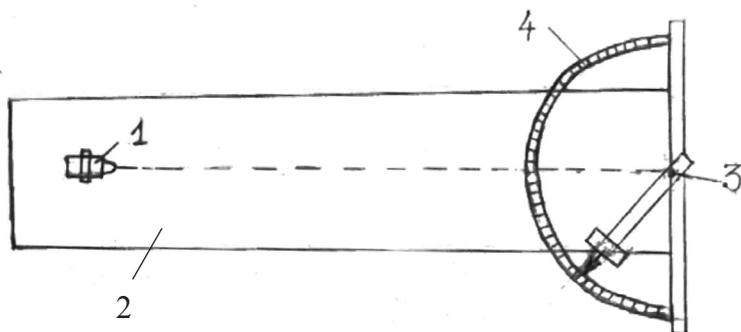


Рис. 2.

Лабораторная установка состоит из исследуемого объекта 3, фотоприёмника 5, размещенного на вращающейся вокруг оси совпадающей с осью исследуемого объекта скамье. Объект исследования освещается лазером 1. Измерение интенсивности отраженного от предмета света под разными углами к экрану производится с помощью фотоприемника 5, угол измеряется с помощью шкалы с делениями (транспортир) 4. Элементы установки размещены на платформе 2.

Электрический ток фотоприемника 5, пропорциональный мощ-

ности лазерного излучения, отраженного в данном направлении исследуемого лазера, фиксируется микроамперметром.

Конструкция фотоприемного блока показана на рис. 3. Блок состоит из фотодиода ФД, фильтра Ф, помещенных в светонепроницаемый корпус, снабженный коллиматором К. Использование в составе фотоприемного блока коллиматора позволяет выделить более узкую область рассеянного в направлении регистрации лазерного излучения.

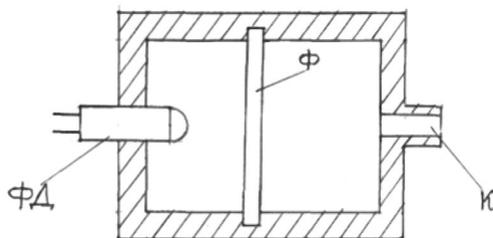


Рис. 3.

В работе определяется зависимость силы электрического тока на выходе фотоприемника от величины угла его поворота относительно оси.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 2, собирается установка.

2. Измеряется зависимость мощности электрического тока на выходе фотоприемника от величины угла его поворота относительно оси, фиксируются ток фотодиода и угол его поворота относительно оси лабораторной установки.

3. В полярных координатах строится диаграмма рассеивания лазерного излучения.

В лабораторной работе в качестве лазерного источника можно использовать лазерную указку. Приемником сигнала являлся фотодиод ФД-256. В качестве регистратора сигнала можно использовался электронный мультиметр. В качестве объектов исследования может служить бумага различных оттенков.

На рис. 4 представлены полученные на экспериментальной лабораторной установке результаты: а – диаграмма рассеивания ла-

зерного излучения для белой бумаги, б – диаграмма рассеивания лазерного излучения для черной бумаги [4].

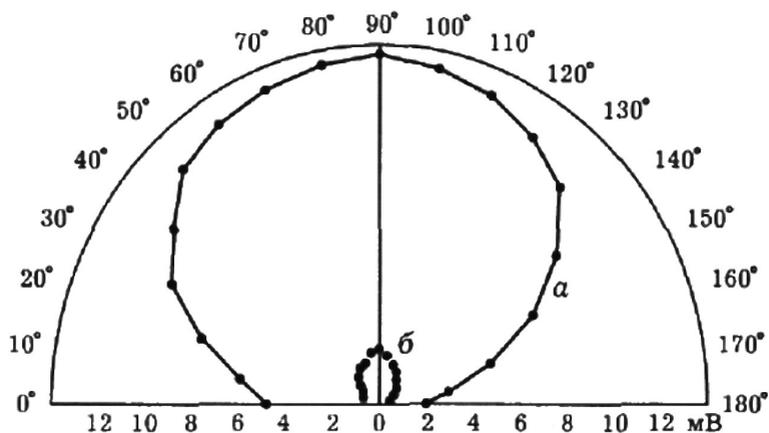


Рис. 4.

#### Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976.
2. Гуртов В. А. Оптоэлектроника и волоконная оптика: учебное пособие / В. А. Гуртов. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2005.
3. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем / Г. Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 640 с.
4. Кирин И. Г. Лабораторная работа по определению диаграммы направленности отраженного от объекта света / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук, С. Ф. Гумарова // Учебная физика. – 2008. – № 2. – С. 88–89.

## 11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ЛАЗЕРНЫЙ МИКРОФОН»

*Лабораторная работа посвящена изучению лазерного микрофона, демонстрирующего применение лазера как приемника звука от оконного стекла.*

Лазерный микрофон представляет собой приемник звука от оконного стекла [1, 2]. Схемы построения лазерных микрофонов показаны на рис. 1. На этом рисунке: 1 – лазер, 2 – стекло, 3 – фотоприемник, 4 – делитель пучка. На рис. 1а изображен простейший вариант построения лазерного микрофона. В этой схеме луч лазера падает на стекло окна под некоторым углом (например, 45 градусов). На границе стекло – воздух происходит модуляция луча звуковыми колебаниями. Отражённый луч улавливается фотодетектором, расположенным с другой стороны окна под углом, равным углу падения. Система довольно простая, но требует тщательной юстировки.

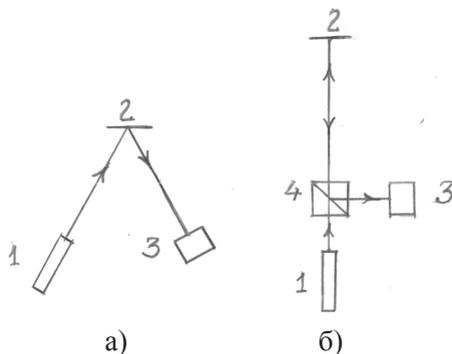


Рис. 1.

Второй способ построения лазерных микрофонов, основанный на использовании делителя пучка, показан на рис. 1б. Он позволя-

ет совместить лазер и детектор. В этом случае отпадает необходимость в тщательной юстировке системы. Кроме того, применение делителя позволяет свести падающий и отражённый луч в одну точку.

Схема лабораторной установки по изучению лазерного микрофона показана на рис. 2. На этом рисунке: 1 – лазер; 2а, 2б – падающий и отраженные лазерные пучки; 3 – объект исследования; 4 – фотоприемный блок; 5 – регистратор приемного сигнала (осциллограф); 6 – источник электропитания лазера; 7 – генератор звуковых колебаний.

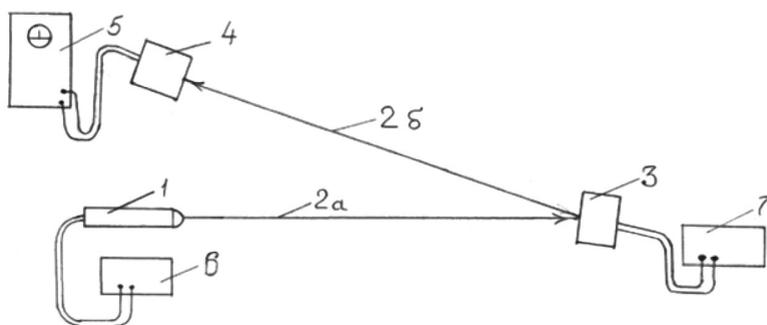


Рис. 2.

Объект исследования 3 представляет собой модулятор, сигнал на который подается с генератора звуковых колебаний 7. Модулятор выполнен на базе телефона ТОН-2, в котором вместо стандартной мембраны телефона используется мембрана с зеркальным покрытием, а в пластмассовом кольце телефона, с помощью которого мембрана крепится к телефону, вместо отдельных отверстий изготавливается одно отверстие, диаметр которого незначительно меньше диаметра мембраны.

Фотоприемный блок лабораторной установки 4 выполнен на базе фотодиода ФД-256 и объектива от фотоаппарата марки «Гелиос» (можно и другой марки). На входе объектива установлен светофильтр, пропускающий только излучение лазера, в фокусе объектива установлен фотодиод. Все элементы фотоприемного блока размещены в одном корпусе.

В установке излучение от лазера направляется на модулятор 3, который располагают на одной оптической оси с падающим лазерным пучком 2а. Затем модулятор поворачивается вокруг его горизонтальной оси на небольшой угол ( $10 - 15^\circ$ ). Далее размещается фотоприемный блок таким образом, чтобы его оптическая ось совпала с оптической осью отраженного от модулятора лазерного пучка 2б.

В работе исследуется амплитудно-частотная характеристика лазерного микрофона и зависимость амплитуды сигнала на его выходе от расстояния между лазером и модулятором.

#### Литература

1. Хореев А. А. Средства акустической разведки: направленные микрофоны и лазерные акустические системы (обзор) / А. А. Хореев // Спецтехника и связь. – 2008. – № 3. – С. 34–43.

2. Лазеры: Устройство и действие: учеб. пособие / А. С. Борейшо. – СПб.: Мех. ин-т, 1992. – 215 с.

## 12. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ЛИДАРА»

*Лабораторная работа посвящена изучению лидаров, которые можно рассматривать как разновидность лазерных локаторов, используемых для диагностики загрязнений атмосферы.*

Проблема загрязнения воздуха в больших городах и промышленных районах становится в наши дни всё более острой. В выхлопах автомобильных двигателей, реактивных двигателей современных авиалайнеров, в выбрасываемых в атмосферу отходах промышленного производства содержится много соединений, вредных для здоровья людей: двуокись серы ( $\text{SO}_2$ ), окись углерода или, иначе говоря, угарный газ ( $\text{CO}$ ), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), окись азота ( $\text{NO}$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и пр. Возрастает содержание в воздухе частичек сажи и пыли, водяных капелек с растворенными в них различными химическими соединениями.

Для обнаружения в атмосфере тех или иных загрязнений проводят химический анализ проб воздуха. К сожалению, такой анализ требует обычно значительного времени. К тому же не всегда просто взять пробу воздуха. Представьте, например, что надо взять (и притом быстро) пробу воздуха позади только что пролетевшего авиалайнера на высоте в несколько километров. Или хотя бы взять пробу воздуха вблизи устья заводской трубы высотой более ста метров.

Подобные трудности не возникают, если, вместо того чтобы брать пробы воздуха, зондировать атмосферу лазерным лучом. Лазерный контроль загрязнений атмосферы получил в настоящее время широкое распространение во всем мире. Он имеет ряд весьма существенных достоинств. Во-первых, этот метод контроля является дистанционным; он может легко осуществляться на расстояниях до нескольких километров (в отдельных случаях до десятков километров). Во-вторых, лазерный контроль отличается высокой

степенью чувствительности. Он позволяет обнаружить загрязнение атмосферы тем или иным соединением даже в случаях, когда доля этих соединений в атмосфере всего  $10^{-9} - 10^{-10}$ . В-третьих, анализ химического состава загрязнений производится в данном случае очень быстро, так что возможно отслеживание изменений этого состава во времени.

На практике применяют две оптические схемы лазерного зондирования атмосферы, представленные на рис. 1, на котором: 1 – лазер, 2 – фотоприемник, 3 – отражатель.

В первой лазерный луч посылают по подлежащей контролю трассе к фотоприемнику, который находится в конце трассы. Возможен вариант, когда в конце трассы установлен отражатель, а фотоприемник совмещен с лазерным излучателем (при этом лазерный луч проходит трассу дважды – туда и обратно). Оба варианта данной оптической схемы показаны на рис. 1а.

Во второй схеме (рис. 1б) лазерный луч посылается в контролируруемую область воздушного пространства. Фотоприемник, совмещенный, как правило, с излучателем, улавливает излучение, приходящее назад из облучаемой лазером области пространства. В этом случае лазерная система контроля состояния атмосферы называется **лидаром**. Лидар можно рассматривать как разновидность лазерного локатора.

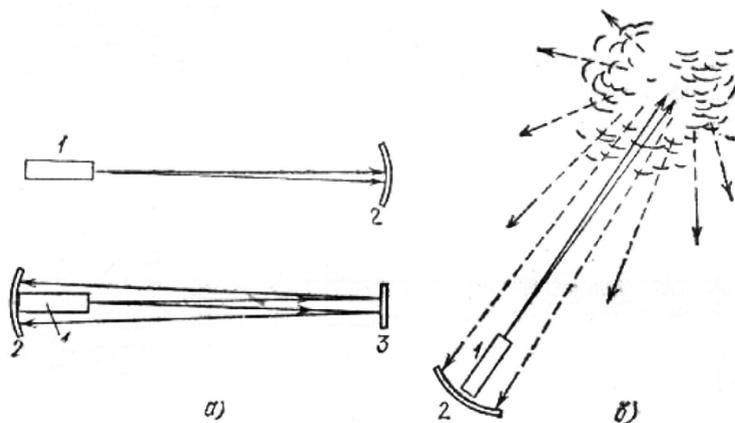


Рис. 1.

При использовании схемы, показанной на рис. 1а, измеряют интенсивность лазерного луча после прохождения трассы. Существенно, что это измерение выполняют для различных частот лазерного излучения, для чего используют лазеры с плавной перестройкой частоты (например, лазеры на красителях) или лазеры в сочетании с параметрическим генератором света. Каждое химическое соединение поглощает свет с определенной частотой (или с несколькими определенными частотами). Измеряя частотную зависимость интенсивности лазерного излучения, регистрируемого фотоприемником, можно по значениям частоты, при которых наблюдаются резкие уменьшения («провалы») в интенсивности света, сделать заключение о наличии в атмосфере тех или иных химических соединений. В результате поглощения лазерного излучения молекулами этих соединений и возникают «провалы» в интенсивности излучения на соответствующих частотах.

Используя схему, показанную на рис. 1б (схему лидара), регистрируют при помощи фотоприемника, либо отраженное лазерное излучение (например, излучение, отраженное от скопления аэрозолей), либо излучение, рассеянное аэрозольными частицами либо отдельными молекулами, либо излучение, испускаемое теми или иными молекулами после поглощения ими лазерного излучения.

Существует несколько физических механизмов рассеяния света. Для контроля химического состава загрязнений атмосферы используют комбинационное рассеяние света, поскольку при этом рассеянии изменяется частота света.

Например, будем зондировать атмосферу лазерным лучом определенной частоты и измерять спектральный состав света, рассеянного назад. По наблюдаемым в рассеянном свете сдвигам частоты (длины волны) можно судить о наличии в атмосфере тех или иных соединений. Предположим, что используется лазер на рубине; его излучение имеет длину излучения 0,694 мкм. Допустим далее, что в рассеянном излучении, наряду с длиной волны 0,694 мкм, зарегистрированы длины волн 0,798 и 0,785 мкм. Сдвиг длины волны  $0,798 - 0,694 = 0,104$  мкм соответствует частоте колебаний молекулы  $\text{CO}$ , а сдвиг  $0,785 - 0,694 = 0,091$  мкм – частоте колебаний молекулы  $\text{NO}$ . Значит, в атмосфере присутствуют угарный газ и окись азота.

По ряду причин для контроля атмосферы по комбинационному рассеянию света удобнее использовать лазерное излучение с дли-

ной волны около 0,3 мкм. На практике обычно применяют вторую гармонику излучения рубинового лазера (0,347 мкм), а также четвертую гармонику лазера на гранате с неодимом (0,266 мкм).

Наряду с комбинационным рассеянием света в лидарах используется явление люминесценции. При этом поглощая лазерное излучение некоторой частоты, примеси затем высвечивают излучение другой (меньшей) частоты. Частота, на которой наблюдается люминесценция, имеет определенное значение (или несколько определенных значений) для данного соединения. Изучая спектральный состав улавливаемого приемником лидара излучения люминесценции, можно выявить наличие в атмосфере тех или иных химических соединений [1–3].

Лидары уже достаточно давно и успешно применяются для контроля широкого спектра экологических параметров.

Схема лабораторной установки для изучения лидара показана на рис. 2.

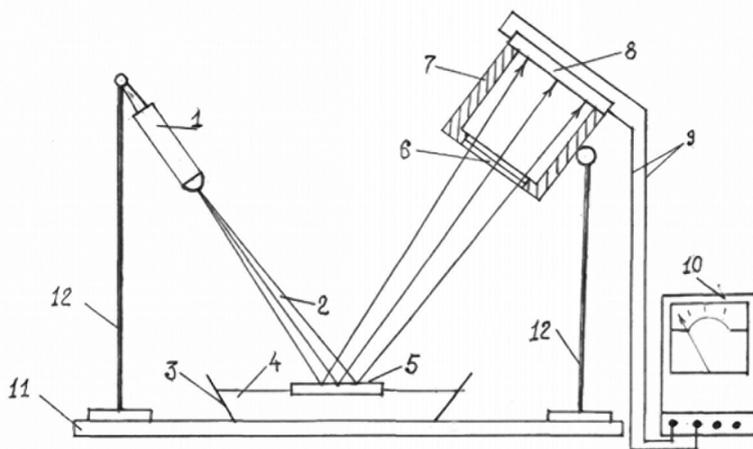


Рис. 2.

Лабораторная установка состоит из лазера 1, фотопреобразующего блока, состоящего из светофильтра 6, корпуса 7 и фотоэлементов 8. Измерение электрического тока на выходе фотопреобразующего блока осуществляется микроамперметром 10, подключенного к фотоэлементам проводами 9.

Все элементы экспериментальной установки расположены на одной подставке 11, на которую опираются штативы для крепления лазера и фотоэлектрического блока 12.

В установке лазерное излучение 2 от лазера поступает вначале на поверхность воды 4, налитой в сосуд 3. Если в сосуде отсутствует объект исследования 5, то сигнал на выходе установки отсутствует. Если на поверхность воды налить, например, отработанное машинное масло, то на выходе установки появится сигнал.

*В работе определяются значения амплитуды сигнала на выходе фотоприемника для различных исследуемых образцов.*

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 2, собирается установка.

2. На расстоянии около 40–50 см от лазера устанавливается фотопреобразующий блок.

3. Включается лазер. Фиксируется ток  $\mu\text{A}$  микроампера.

В составе лабораторной установки в качестве фотоприемника можно использовать фотодиод, например ФД-216. Измерительным прибором служил микроамперметр, позволяющий измерять токи от 1 до 50 мкА. В качестве фотоприемников можно использовать и другие устройства, например ФЭУ или фотоэлементы. Главные условия – небольшие размеры и высокая чувствительность. В качестве лазера можно использовать, например, инжекционный полупроводниковый лазер, лазерную указку. Большая мощность светоизлучающего элемента и более высокая чувствительность светоприемника и индикатора позволяют увеличить расстояние между светоизлучающим и светоприемным устройством, что повышает качество результатов измерения.

#### Литература

1. Лидары / под ред. Г. Вальтера. – М. : Мир, 2001.
2. Лазерная спектроскопия атомов и молекул / под ред. Г. Вальтера. – М. : Мир, 1979.
3. Иванов П. С. Лидарные системы и их применение / П. С. Иванов, А. К. Марчук. – М. : Энергоатомиздат, 1999. – 340 с.

### 13. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ЛАЗЕРНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ»

*Лабораторная работа посвящена изучению лазерных линий передачи энергии – уникальным и перспективным системам передачи энергии.*

Лазерные линии передачи энергии состоят из лазера и фотоэлектрического блока (рекуператора), обеспечивающего преобразование оптического излучения в электроэнергию. Они обеспечивают: передачу световой энергии в заданную точку объекта с последующим ее преобразованием в электрическую энергию, полную гальваническую развязку передающей и приемной частей линии, и используются для передачи энергии между космическими объектами, в наземных условиях для электропитания информационно-измерительных и управляющих элементов систем высоковольтных аппаратов, находящихся под различными потенциалами [1–7].

В общем случае лазерная линия передачи энергии может содержать: один или несколько лазеров, объединенных с помощью оптических систем в один источник лазерного излучения на передающей части лазерной линии передачи энергии; один лазер на передающей стороне линии и несколько приемных блоков и так далее.

В составе лазерных линий передачи энергии могут быть использованы практически все виды лазеров. Наиболее предпочтительными являются: газовые, твердотельные, полупроводниковые.

В составе приемных блоков лазерных линий передачи энергии, как правило, используются фотоэлектрические преобразователи световой энергии в электрическую.

Конкретная схема лазерной линии передачи энергии определяется особенностями передающей и приемной части линии и той средой, через которую передается энергия.

К конструкциям фотоэлектрических блоков лазерных линий передачи энергии предъявляются особые требования. Эти требова-

ния вытекают из того, что интенсивность оптического излучения, поступающего на эти блоки от лазера, в силу его высокой яркости, может достигать такой величины, при которой не только будет нарушен термический режим работы фотоэлементов блока, но и может произойти их разрушение [1].

Как правило, они включают оптические системы, позволяющие снизить яркость лазерного излучения, прежде чем оно попадет на фотоэлектрические элементы.

Расчет потерь оптического излучения в конструкциях фотоэлектрических блоков сводится к учету поглощения света в оптических элементах и на зеркалах. При использовании высококачественных оптических материалов и зеркал с отражающими покрытиями, подобранных под спектр используемого в составе лазерной линии передачи энергии лазера эти потери невелики и составляют  $\sim 4 - 5\%$ .

Мощность фотоэлектрической батареи, составленной из отдельных фотоэлектрических элементов в фотоэлектрических блоках с учетом ее освещенности, может быть определена с помощью соотношения [1]:

$$P_{\sigma} = S \cos \Gamma \eta_5 F A_{\sigma},$$

где  $S$  – плотность потока световой энергии на батарее;  $\Gamma$  – суммарный угол между геометрической осью излучения и нормалью к плоскости батареи;  $\eta_5$  – КПД фотоэлектрического преобразователя;  $A_{\sigma}$  – площадь фотоэлектрической батареи преобразователя;  $F$  – суммарный фактор, учитывающий особенности фотоэлектрического элемента (типичные значения – 0,8).

Выходной ток фотоэлектрической  $I_{\sigma}$  батареи и ее выходное напряжение  $U_{\sigma}$ :

$$\begin{aligned} I_{\sigma} &= N_{np} I_{\sigma}, \\ U_{\sigma} &= N_{nc} U_{\sigma}, \end{aligned}$$

где  $N_{nc}$  – число элементов, соединенных последовательно;  $N_{np}$  – число элементов, соединенных параллельно,  $I_{\sigma}$  и  $U_{\sigma}$  – ток и напряжение отдельных фотоэлементов.

При использовании в составе фотоэлектрических блоков фотоэлектрических элементов с шириной запрещенной зоны, точно соответствующей частоте передаваемого лазерного излучения, КПД

преобразования лазерного излучения в электрический ток может достигать 80% и более.

Схема лабораторной установки для изучения лазерной линии передачи энергии показана на рис. 1.

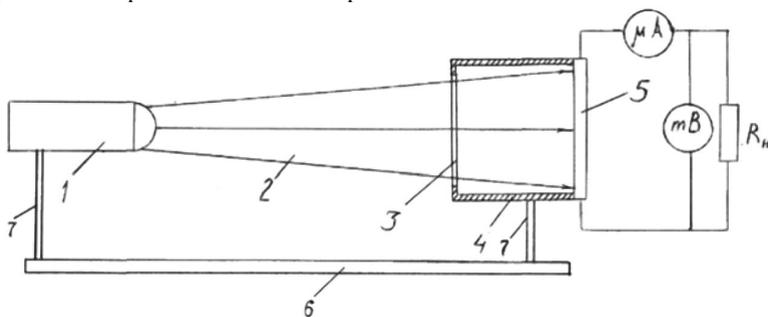


Рис. 1.

Лабораторная установка состоит из лазера 1 и фотопреобразующего блока, состоящего из светофильтра 3, корпуса 4 и фотоэлементов 5. Измерение мощности электрического тока на выходе лазерной линии передачи энергии осуществляется микроамперметром  $\mu A$  и милливольтметром  $mV$ . На схеме 2 – лазерный обозначен пучок,  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

Все элементы экспериментальной установки расположены на одной оси и закреплены на оптическом рельсе 6, снабженном шкалой для отсчета перемещений.

*В работе определяется* зависимость мощности электрического тока на выходе фотоэлектрического блока от мощности поступающего на него лазерного излучения. Мощность поступающего на фотоэлектрический блок лазерного излучения изменяется путем изменения коэффициента пропускания светофильтра 3.

Порядок выполнения работы следующий:

1. В соответствии со схемой, показанной на рис. 3, собирается установка.

2. На расстоянии около 40–50 см от лазера устанавливается фотопреобразующий блок.

3. Включается лазер. Фиксируется ток  $\mu A$  микроампера и напряжение  $mV$ .

4. Вычисляется мощность электрического тока на выходе лазерной линии передачи энергии по формуле:  $P = U I$ .

5. Определение выходной мощности лазерной линии передачи энергии производится несколько раз, определяется среднее значение, которое и принимается за значение выходной мощности лазерной линии передачи энергии.

#### Литература

1. Кирин И. Г. Специальные радиационно-устойчивые волоконно-оптические и оптоэлектронные датчики и системы / И. Г. Кирин. – М.: Университетская книга, 2008. – 148 с.

2. Кирин И. Г. Устройства электропитания с использованием световодов / И. Г. Кирин // Электротехника. – 1990. – № 8. – С. 29–35.

3. Кирин И. Г. Фотопреобразователь / И. Г. Кирин. – А. С. СССР. – № 1572355. – 1988.

4. Кирин И. Г. Фотопреобразующий блок / И. Г. Кирин, В. К. Богданский. – А. С. СССР. – № 1814458. – 1991.

5. Кирин И. Г. Лабораторная работа «Лазерная линия передачи энергии» / И. Г. Кирин, М. И. Никитчук // Учебная физика. – 2012. – № 4. С. 39–40.

6. Кирин И. Г. Линия передачи энергии / И. Г. Кирин. – Авторское свидетельство СССР. – № 1720126 А1. – 1989.

7. Кирин И. Г. Источник электропитания / И. Г. Кирин. – Авторское свидетельство СССР. – № 1598805 А1. – 1989.



Игорь Григорьевич Кирин

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лабораторный практикум

Подписано в печать 23.09.2013.

Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Объём 3,3 уч.-изд. л.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Гарнитура «Times». Тираж 500 экз. Заказ № 694.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВПО «ОГИМ»

460038, г. Оренбург, ул. Волгоградская, 16