

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

**ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА**

**ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ
ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

**Методические указания к
лабораторным работам по физике**

**Ленинград
1978**

Методические указания содержат описание сложных современных оптических измерительных приборов, на которых студенты выполняют лабораторные работы по разделу физики «Оптика», правила работы с приборами и порядок выполнения лабораторной работы; предназначены для студентов технических факультетов института.

Указания рекомендованы к изданию кафедрой экспериментальной физики и методической комиссии физико-механического факультета Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина.

Составители: Л. Д. Неудимова, Н. С. Целищев

Оптические приборы физической лаборатории

Методические указания к лабораторным работам по физике

Редактор С. А. Мартынова

Корректоры С. Д. Рутковская, Н. Н. Тарасова

Сдано в набор 19/XII 1977 г.

Подписано к печати 14/II 1978 г.

Формат бумаги 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 3. Усл.-печ. л. 3,75.

Уч.-изд. л. 3,6. Тираж 5000 экз. Заказ 1291. Цена 12 коп.

Издание ЛПИ имени М. И. Калинина,
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

Лаборатория полиграфических машин Ленинградского ордена Ленина
политехнического института имени М. И. Калинина
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

ВВЕДЕНИЕ

Оптика — раздел физики, изучающий методы получения, распространения и регистрации электромагнитного излучения в области длин волн от 0,01 до 1000 мкм. Эта область в коротковолновой части граничит с областью рентгеновских лучей, а в длинноволновой — с радиодиапазоном. Вся эта обширная область оптического диапазона делится в свою очередь на три: ультрафиолетовая, видимая (0,4—0,8 мкм) и инфракрасная, в которых методики создания и регистрации излучения имеют свои особенности.

Оптика еще в середине XIX века вышла за пределы видимого диапазона и предметом ее изучения стали процессы, не укладывающиеся в понятия геометрической оптики. Возникший новый раздел — физическая оптика — анализировал процессы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, что позволило получить независимым от других методов путем более точные сведения о структуре вещества. В настоящее время оптические методы широко применяются не только в научных лабораториях для изучения космических, микроскопических явлений, но и в заводских лабораториях оптическими методами анализируются различные процессы технологии, структуры твердых, жидких и газообразных веществ, поэтому знакомство с оптическими приборами и методами измерений необходимо каждому инженеру, чтобы иметь возможность получать более точные сведения об изучаемом объекте.

Задача данных¹ указаний помочь студентам, начинающим исследователям оптических явлений, приступающим к выполнению лабораторного практикума по разделу курса физики — оптике, который за последние два года претерпел сильные изменения. Лабораторные работы оснащены современными измерительными приборами, описание которых отсутствует в существующей литературе. Здесь дается описание конкретных устройств, являющихся источниками, приемниками излучения, в основном, видимого диапазона, монохро-

матора и гoniометра. Описанию устройств предшествует общая часть, в которой кратко излагаются физические процессы и закономерности, знание их позволит студентам с пониманием выполнять измерения и исследования независимо от более детального изучения соответствующего материала по курсу.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником оптического излучения называется прибор, предназначенный для преобразования какого-либо вида энергии в энергию электромагнитных излучений, лежащих в оптическом диапазоне спектра. По природе излучения источники можно разделить на два больших класса: источники теплового излучения, к которым относятся все пламенные источники света и электрические лампы накаливания, и источники люминесцентного излучения, т. е. газоразрядные лампы, использующие явление электрического разряда в воздухе, в инертных газах или парах металлов, люминесцентные лампы и др. Лазеры, используемые в последнее время в качестве источников когерентного излучения, относят ко второму классу или выделяют в отдельную группу.

Источники теплового излучения

Любое твердое тело, имеющее температуру, отличную от абсолютного нуля, излучает в окружающее пространство энергию. Тепловое излучение — единственный вид, являющийся равновесным. При термодинамическом равновесии число переходов системы из состояния 1 в состояние 2 должно быть в точности равно числу обратных переходов — из состояния 2 в состояние 1 (принцип детального равновесия). Согласно этому принципу любое тело должно излучать в окружающее пространство ровно столько фотонов, сколько оно поглотило из падающего на него равновесного излучения, причем это равенство должно выполняться для сколь угодно малого интервала частот и направлений.

Все тела делятся на три класса: абсолютно черные, серые и избирательные. Абсолютно черное тело поглощает всю падающую на него энергию независимо от спектрального состава потока и от температуры абсолютно черного тела и одновременно восполняет убыль фотонов своим тепловым излучением. Испускательная способность * абсолютно черных тел зависит только от температуры и определяется формулой Планка:

$$r(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2 \lambda T} - 1)^{-1},$$

* Определение термина «Испускательная способность» дано на стр. 9.

где $C_1 = 3,74 \cdot 10^8$ Вт $\text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-4}$; $C_2 = 1,438 \cdot 10^4$ мкм · град. Кривые излучения абсолютно чистого тела приведены на рис. 1.

Реальные тела относятся к серым и избирательным. У серых тел (рис. 2) коэффициент поглощения (или излучения) электромагнитного излучения a меньше единицы и не зависит от длины волны и температуры. Обычно это справедливо для какого-то определенного интервала длин волн и температур. Испускательная способность серых тел определяется как $r'(\lambda, T) = ar(\lambda, T)$. Для избирательного излучателя коэффициент поглощения a зависит от длины волны и температуры. Испускательная способность избирательных тел определяется как $r''(\lambda, T) = a(\lambda, T)r(\lambda, T)$.

Лампа накаливания — электрический источник света с излучателем в виде накаливаемой нити тугоплавкого материала. Наиболее часто нить изготавливают из вольфрама, обладающего высокой температурой плавления $t = 3410^\circ\text{C}$ и малой скоростью испарения. Для предотвращения окислении

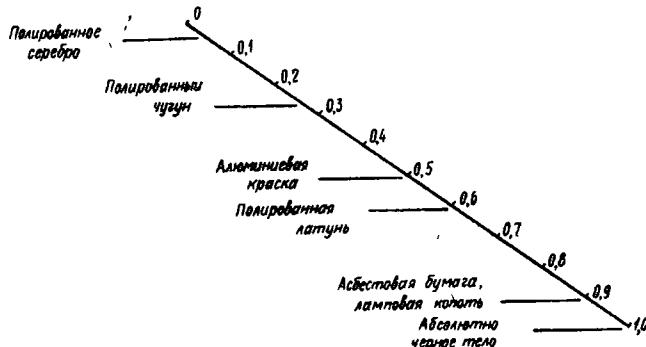


Рис. 1. Кривые излучения абсолютно чистого тела

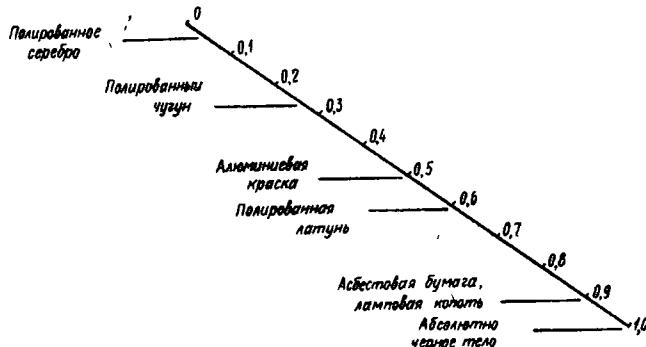


Рис. 2. Значения коэффициента поглощения различных материалов при комнатной температуре

нити баллон откачивают до давления $10^{-4} - 10^{-5}$ мм рт. ст. (вакуумные лампы) или заполняют инертным газом (газонаполненные лампы).

Штифт Нернста представляет собой стержень из окислов редкоземельных элементов, таких как цирконий, торий и иттрий. В холодном состоянии штифт Нернста не проводит электрического тока и поэтому перед включением должен

быть предварительно подогрет близко расположенным нагревателем из платиновой проволоки. Устройство штифта Нернста приведено на рис. 3, а. Излучение штифта Нернста лежит в области от 1 до 16 мкм. Кривые излучения показаны на рис. 3, б. Применяется как источник излучения в инфракрасных спектрометрах.

Глобар (иногда называют силитовый стержень или штифт Глобара) — стержень из прессованного порошкообразного карборунда. Разогрев стержня до 1200° С производится

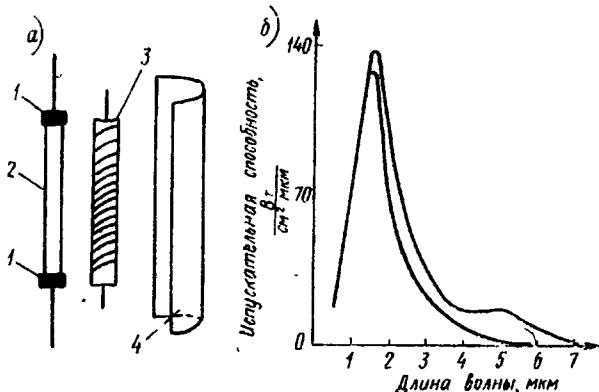


Рис. 3. Штифт Нернста: а — устройство; б — кривые излучения при нормальной температуре для 19,6 и 102 Вт

электрическим током. Глобар необходимо окружать рубашкой, охлаждаемой проточной водой. В области длин волн, больших 15 мкм, испускательная способность глобара несколько выше, чем у штифта Нернста; в близкой и средней инфракрасной области глобар также дает хорошие результаты, хотя его испускательная способность ниже, чем у штифта Нернста.

Источники люминесцентного излучения

В настоящее время под люминесценцией понимается излучение, избыточное над тепловым излучением тела при данной температуре и имеющее длительность, значительно превышающую период световых волн. Понятие люминесценции относится не к отдельным излучающим атомам или молекулам, а к их совокупности — телам.

При люминесценции излучение энергии происходит при переходе электронов с более высоких энергетических уровней

на более низкие, положение тех и других определяется структурой вещества. В невозбужденном состоянии электроны занимают все нижние разрешенные уровни энергии, причем любая система атомов в невозбужденном состоянии может находиться сколь угодно долго. Поглощая энергию, поступающую извне, электроны переходят на более высокие уровни — возбужденные. В зависимости от того, за счет какой энергии происходит возбуждение атома, различают следующие виды люминесценции: фотолюминесценция — возбуждение производится квантами света; катодолюминесценция — за счет кинетической энергии электронов, бомбардирующих атомы; электролюминесценция — возбуждение создается электрическим полем и др.

Из возбужденного состояния система стремится перейти в невозбужденное, причем переходы могут происходить непосредственно в основное состояние (резонансная люминесценция, рис. 4, а), или сначала на промежуточный уровень, чаще всего это безызлучательный переход, и затем только в основное состояние (спонтанная люминесценция, рис. 4, б) или каким-либо другим способом, например за счет рекомбинации электронов и дырок (рекомбинационная люминесценция, рис. 4, в). Выделяющаяся при этом энергия

$\Delta E = E_2 - E_1$ может излучаться в виде квантов света. Кванты света называются фотонами. E_2 — энергия уровня, с которого идет излучательный переход, E_1 — энергия уровня, на который переходит электрон. Расположение уровней определяется структурой вещества, а значение ΔE определяет частоту света, на которую приходится максимум излучения. Ширина же полосы излучения зависит от ширины уровней, между которыми был совершен переход.

Газоразрядные источники — приборы, в которых электрическая энергия преобразуется в оптическое излучение при прохождении электрического тока через газы или пары металлов. Они обычно представляют собой стеклянные колбы различных форм, в которые вводится газ, чаще инертный, до различного давления или иногда небольшое количество металла с высокой упругостью пара. В колбу герметично впа-

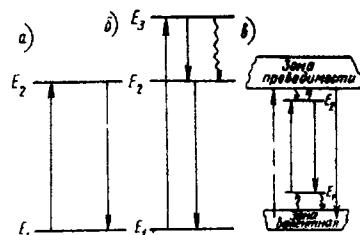


Рис. 4. Схемы энергетических переходов при различных процессах люминесценции: а — резонансная люминесценция, б — спонтанная люминесценция с одним промежуточным переходом; в — рекомбинационная люминесценция; прямые стрелки вверх — поглощение; прямые стрелки вниз — излучение; волнистые стрелки — безызлучательные переходы

яны электроды, между которыми происходит разряд. Обычно применяют дуговой и тлеющий разряды, в импульсных лампах — искровой.

Характеристики источников излучения

Спектральные характеристики. По спектральному распределению излучаемой энергии источники делят на три класса: с линейчатым, полосатым и сплошным спектрами.

1. У источников с линейчатым спектром излучение происходит в пределах узких участков спектра — линий (рис. 5, б, г). Энергетический поток одной линии считается однородным. Линейчатый спектр имеют газоразрядные источники излучения, у которых разряд происходит в атмосфере инертного газа или паров металла, находящихся обычно при низких давлениях.

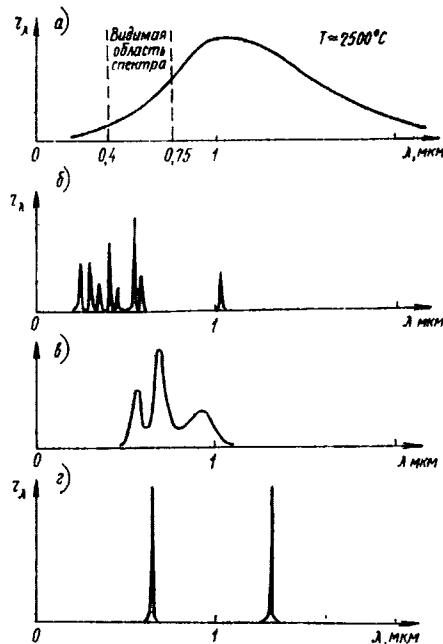


Рис. 5. Спектральное распределение излучения некоторых источников света:
а — лампа накаливания (сплошной спектр); б — ртутная дуговая лампа (линейчатый спектр); в — электролюминесцентный источник; г — газовый (He—Ne) лазер

2. У источников с полосатым спектром излучение происходит в пределах достаточно широких участков спектра — полос, отделенных одна от другой темными промежутками. Полосатые спектры имеют, например, газоразрядные источники излучения, у которых разряд происходит в атмосфере инертного газа или паров металла, находящихся под высоким давлением.

3. Сплошной спектр источников можно представить в виде отдельных полос, примыкающих друг к другу (рис. 5, а, в). Сплошной спектр имеют все источники теплового излучения и источники люминесцентного излучения жидких и твердых тел.

Для характеристики интегральной (суммарной) излучаемой энергии вводится понятие энергетической светимости тела R_s . Под энергетической светимостью понимается поток

энергии (на всех частотах), испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π).

Для описания спектрального распределения излучаемой энергии, т. е. распределения энергии по длинам волн, вводится понятие испускательной способности тела r_λ . Обозначим поток энергии, испускаемый единицей поверхности тела в интервале длин волн $d\lambda$, через dR_λ . При малой величине интервала $d\lambda$ поток dR_λ пропорционален $d\lambda$. Тогда можно записать $dR_\lambda = r_\lambda d\lambda$. Испускательная способность, а значит, и энергетическая светимость зависят от температуры, поэтому их обо-

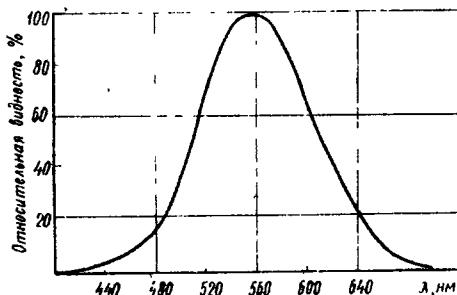


Рис. 6. Кривая видности

значают $r_{\lambda T}$, $K_{\nu T}$. Зная испускательную способность, можно вычислить энергетическую светимость: $R_{\nu T} = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$.

Фотометрические характеристики. Световой поток. Свет — это совокупность электромагнитных колебаний с длинами волн, заключенными в некотором интервале $\Delta\lambda$. Поток электромагнитного излучения, приходящийся на интервал от λ до $\lambda + d\lambda$, обозначим $d\Phi_\nu$. Действие света на глаз человека зависит от длины волны света. Чувствительность глаза к длине волны определяется функцией видности $V(\lambda)$ (рис. 6). Для того чтобы количественно определить интенсивность света с учетом его действия на глаз, вводится понятие светового потока $d\Phi = V(\lambda) d\Phi_\nu$. Световой поток определяют как поток лучистой энергии, оцениваемой по зрительному ощущению. За единицу светового потока принимается люмен. Световому потоку в 1 лм при излучении на длине волны $\lambda = 0,555$ мкм соответствует поток энергии $\Phi_\nu = 0,0016$ Вт.

Сила света служит основной характеристикой точечного источника. Под точечным понимается такой источник, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием от источника до места наблюдения. Его излучение

в изотропной среде представляет собой сферическую волну. Силу света определяют как световой поток, приходящийся на единицу телесного угла: $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$. Если сила света не зависит от направления, то такой источник называется изотропным и сила света определяется как $I = \frac{\Phi}{4\pi}$. Она измеряется в кандалах (кд).

Светимость. Протяженный источник света обладает некоторой излучающей поверхностью. Для ее характеристики вводятся понятия светимости и яркости. Под светимостью R понимается световой поток, испускаемый единицей поверхности по всем направлениям в пределах телесного угла 2π : $R = \frac{d\Phi}{dS}$. Светимость измеряют в люксах (лк).

Яркость. Светимость характеризует излучение какой-либо части поверхности источника по всем направлениям.

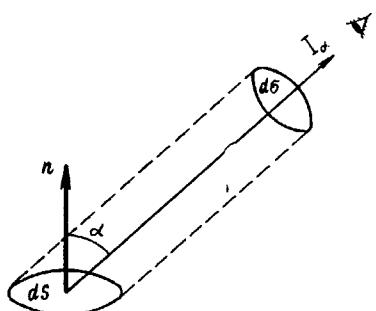


Рис. 7. К определению яркости источника.

к тому же направлению. Яркость можно записать как $B = \frac{dI_a}{d\sigma}$, где dI_a — сила света в выбранном направлении a , $d\sigma$ — проекция излучающей поверхности dS на плоскость, перпендикулярную направлению a (пояснения к определению яркости B приведены на рис. 7).

Для плоской поверхности $d\sigma = dS \cos \alpha$ и $B = \frac{dI_a}{dS \cos \alpha}$. Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям, называются ламбертовскими или косинусными (поток, посыпаемый элементом поверхности такого источника, пропорционален $\cos \alpha$). Для таких источников светимость R и яркость B связаны соотношением $R = \pi B$.

Яркость измеряют в кандалах на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$). Для сравнения приведем значения яркости некоторых поверх-

В реальных условиях чаще требуется охарактеризовать излучение поверхности в определенном направлении. С этой целью и вводится понятие яркости. Именно на яркость реагирует глаз человека. Под яркостью поверхности в данном направлении понимается отношение силы света, излучаемой поверхностью в данном направлении, к проекции светящей поверхности на плоскость, перпендикулярную

ностей: солнце в зените — 10^9 кд/м², ясное небо — $1,5 \cdot 10^8$ кд/м², поверхность вольфрамовой нити в лампе накаливания (100 Вт, 220 В) — $5,5 \cdot 10^6$ кд/м², ртутная лампа сверхвысокого давления — до $1,8 \cdot 10^6$ кд/м².

Осветитель люминесцентный ОИ-17 и ОИ-18

Люминесцентный осветитель предназначен для освещения исследуемых объектов синефиолетовым и ультрафиолетовым светом с длиной волны от 360 до 440 нм. Источником света служит ртутно-кварцевая лампа СВД-120 А. Лампа питается от сети переменного тока 127/220 В через пульт ПРЛ-6.

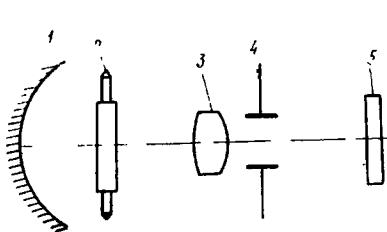


Рис. 8. Оптическая схема осветителя

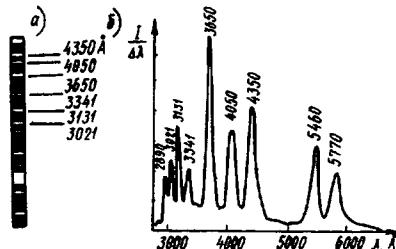


Рис. 9. Спектр ртутной лампы

Оптическая схема осветителя приведена на рис. 8. Она состоит из ртутной лампы 2, коллектора 3, собирающего лучи в пучок, диафрагмы 4 и сменных светофильтров 5, выделяющих из общего спектра излучения источника света определенный участок. 1 — сферический рефлектор. Спектр ртутной лампы приведен на рис. 9. К осветителю прилагается набор светофильтров: светофильтры из стекла УФС-6 толщиной 3 и 5 мм (максимум пропускания $\lambda = 365$ нм) служат для выделения из общего излучения источника света ультрафиолетовых лучей. Светофильтры из стекла ФС1 толщиной 2 и 4 мм (максимум пропускания $\lambda = 400$ нм) применяют для выделения синефиолетовых лучей. Эти светофильтры пропускают красные и инфракрасные лучи, поэтому ими часто пользуются вместе с теплозащитными светофильтрами СЗС14 и СЗС7 для ОИ-18 и СЗС24 и СЗС7 для ОИ-17. Фильтр БС-8 используется для защиты от ультрафиолетовых лучей. В набор также входят нейтральные светофильтры НС-10 и МС-13.

Конструкция. Осветитель люминесцентный ОИ-18 изображен на рис. 10. Основными частями осветителя являются фонарь 4, штатив 7, пульт электропитания ртутной лампы 8 и набор светофильтров. Конструкция осветителя позволяет перемещать фонарь вверх и вниз по колонке и поворачивать его

вокруг колонки. В фонаре сделаны карманы 3, в которых одновременно можно установить четыре светофильтра: три в круглой оправе и один в прямоугольной. Для перемещения коллектора служит ручка 6, для изменения диафрагмы — рукоятка 5, для смещения рефлектора — ручка 2. Лампа центрируется с помощью винта 1. Ртутная лампа включается в сеть через электропульт. Штепсельная вилка с проводом от осветителя вставляется в гнездо на передней стенке пульта.

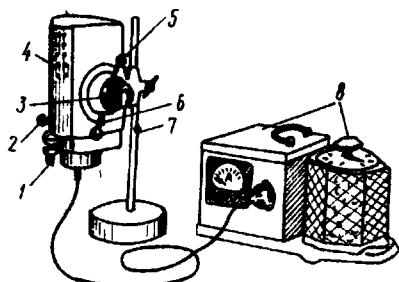


Рис. 10. Осветитель люминесцентный ОИ-18

рабочий ток ртутной лампы равен 1,1 — 1,2 А. В начальный период (примерно в течение 4—6 мин) показания амперметра равны 1,7—2,0 А, но затем ток уменьшается до номинального значения. Яркость лампы регулируется путем изменения тока в цепи с помощью ручки автотрансформатора. При повышенном режиме горения срок службы лампы сокращается.

Лазер

Лазер, или оптический квантовый генератор (ОКГ), представляет собой источник когерентного света. Излучение лазера характеризуется монохроматичностью, почти строгой параллельностью лучей, высокой плотностью потока мощности, поляризацией. Все эти свойства тесно связаны между собой и имеют общую основу — вынужденное излучение атомов.

Принцип усиления электромагнитных волн в микроволновом диапазоне с помощью вынужденного излучения был предложен независимо друг от друга советскими учеными Басовым и Прохоровым и американским — Таунсом. Применение этого принципа к электромагнитным волнам светового диапазона привело к созданию лазера, получившего свое название от первых букв английской фразы — Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света с помощью вынужденного излучения). Первый лазер, работав-

Ртутная лампа подключается к автотрансформатору последовательно с дросселем и амперметром. Амперметр служит для контроля за работой лампы в период пуска и установленного рабочего режима. Перед включением в сеть пульт должен быть заземлен.

Методика работы. Включить ртутную лампу в сеть переменного тока через электропульт. Нормальный

ший на рубине, был создан в 1960 г. Мейманом, в конце этого же года Али Джаваидом был сконструирован первый газовый лазер на смеси гелия и иона.

Вынужденное излучение. Гипотезы о спонтанном и вынужденном излучении были предложены Эйнштейном. Молекула (атом или ион) из возбужденного состояния может перейти на более низкий энергетический уровень самопроизвольно (спонтанно) или под действием внешнего электромагнитного излучения с частотой ν (вынуждению). Эти переходы могут сопровождаться излучением, называемым соответственно спонтанным или вынужденным, причем частота излучения ν определяется соотношением $h\nu = E_m - E_n$, где E_m и E_n — энергетические уровни, между которыми осуществляется переход. При вынужденных переходах излучается квант энергии, дополнительный к кванту внешнего электромагнитного излучения, его вызвавшему. Если кванты спонтанного излучения испускаются в случайных направлениях, то квант вынужденного излучения испускается в том же направлении, что и квант внешнего электромагнитного поля. Частота, фаза и поляризация вынужденного и внешнего излучений совпадают.

Очевидно, для того чтобы получить когерентное излучение, необходимо уменьшить число спонтанных переходов в сравнении с вынужденными переходами. Можно показать, что доля спонтанных переходов уменьшается с увеличением плотности внешнего излучения. В лазерах для увеличения плотности излучения используется оптический резонатор (см. ниже).

Под действием электромагнитного излучения могут происходить переходы не только с более высокого энергетического уровня на более низкий, но и в обратном направлении, соответствующие акту поглощения. Для того чтобы преобладали переходы, соответствующие излучению энергии, необходимо создать инверсную населенность уровней E_m и E_n .

Инверсная населенность. При термодинамическом равновесии распределение молекул по энергетическим состояниям E_i определяется законом Больцмана: $N_i = C e^{-\frac{E_i}{kT}}$, где N_i — число молекул, находящихся при температуре T в состоянии с энергией E_i .

Из этой формулы следует, что чем больше значение энергии E_i , соответствующее данному уровню, тем меньше молекул находится в этом состоянии. При облучении вещества светом с частотой $\nu = \frac{E_m - E_n}{h}$ будет преобладать эффект поглощения. Следовательно, термодинамическое равновесие необходимо нарушить — каким-либо способом создать насе-

ленность верхнего уровня большую, чем нижнего. Тогда говорят, что данное вещество будет иметь инверсную населенность, т. е. обратную той, которая следует из распределения Больцмана. При облучении вещества в этом случае будут преобладать переходы с верхнего уровня на нижний. Это приведет к усилению падающего света частоты $v = \frac{E_m - E_n}{h}$.

Состояние вещества, в котором создана инверсная населенность энергетических уровней, называется активным. Процесс создания инверсной населенности уровней носит название «накачки». Методы накачки разнообразны и зависят от типа лазера — твердотельного, газового, полупроводникового и т. п.

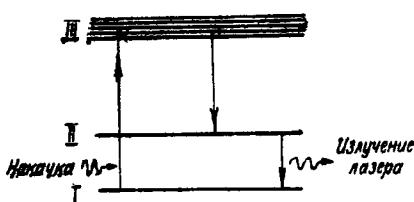


Рис. 11. Схема энергетических уровней трехуровневого лазера

Накачка. Основная задача процесса накачки может быть рассмотрена на примере трехуровневого лазера (рис. 11).

Для создания инверсной населенности на уровне II по отношению к уровню I молекулы (атома или иона) электроны внешним излуче-

нием переводятся с I уровня на III. Уровень III должен быть таким, чтобы время жизни электрона, т. е. время возможного пребывания их в этом состоянии, было очень малым (например, 10^{-8} с). Если время жизни электронов на уровне II будет значительно больше, скажем 10^{-3} с, то электроны, спонтанно переходя с уровня III, будут накапливаться на втором уровне и при достаточно мощной накачке их число превысит число электронов на первом уровне. Созданная таким образом инверсная населенность обеспечит условия для усиления падающего излучения. Однако генерация оптических колебаний может возникнуть только в том случае, если вынужденное излучение, раз возникнув, будет вызывать новые акты вынужденного излучения. Для создания такого процесса активную среду помещают в оптический резонатор.

Оптический резонатор представляет собой систему двух зеркал, между которыми располагается активная среда. Зеркала могут быть плоскими или вогнутыми. Важнейшее их свойство — высокие значения коэффициента отражения. Обычно используются зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием, обладающие сильным отражением и почти не поглощающие света. Пропускание одного зеркала составляет обычно около 1%, другого — 1—2%. Оптические поверхности зеркал обрабатываются с точностью до сотых долей рабочей длины волны света. Схема устройства лазера приведена на рис. 12.

Для пояснения роли системы зеркал вернемся к рис. 11. Между зеркалами располагается активная среда, состоящая из огромного числа одинаковых молекул. С уровня II на уровень I могут происходить и спонтанные и вынужденные переходы. При спонтанном переходе одного из электронов испускается фотон, который вызывает вынужденные переходы электронов других молекул, тоже сопровождающиеся излучением фотонов. Эти фотоны вызывают вынужденный переход в следующих встретившихся на их пути молекулах и т. д. Развивается лавинообразный процесс, причем каждый следующий фотон летит в том же направлении, что и фотон, его вызвавший. Система зеркал позволяет выбрать преимущественное направление движения фотонов — вдоль оси, или, точнее, под малыми углами к ней. Эти фотоны отражаются от зеркал и опять возвращаются в активную среду. Следовательно, фотоны в этом направлении размножаются. Фотоны, летящие в других направлениях, покидают активную среду, и образования каскадов фотонов не происходит. Таким образом, резонатор обеспечивает многократное прохождение световых волн, распространяющихся вдоль его оси, по усиливающей среде, вследствие чего может быть достигнута высокая мощность излучения. Для возникновения резонанса необходимо, чтобы на длине резонатора L укладывалось целое число n полуволн, т. е. $n\lambda = 2L$. При достижении определенной мощности излучение выходит через зеркала (особенно через зеркало с большим значением коэффициента пропускания).

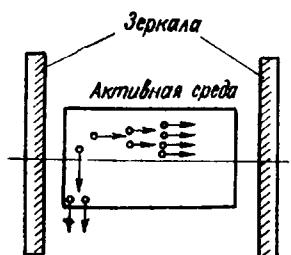


Рис. 12. Схема устройства лазера

Типы лазеров

Тип лазера определяется тем, какое активное вещество используется для получения генерации излучения. В настоящее время существуют твердотельные, полупроводниковые, жидкостные, газовые и молекулярные лазеры. Характеристики некоторых лазеров приведены в табл. 1*.

Наиболее распространеными из твердотельных лазеров являются рубиновые, а также лазеры на стекле, активированном неодимом, лазеры на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом. Твердотельные лазеры чаще используются в нм-

* Характеристики приводятся по данным Д. Рэди. Действие мощного лазерного излучения М., «Мир», 1974.

Таблица 1

Тип лазера	Активное вещество	Длина волны, мкм	Мощность в непрерывном режиме, Вт	Пиковая мощность в импульсе, Вт	Угол расходимости, мрад
Газовый	He—Ne	0,6328	0,001—0,1	—	0,2—1
	Ar	0,4880 0,5145	1—10	20	0,5—1
Молекулярный	CO ₂	10,6	10—5000	10 ⁶	1—4
	Рубин	0,6943	1	До 10 ⁹	1—10
	Стекло с Nd	1,06	—	До 4·10 ⁹	0,5—10
Полупроводниковый	GaAs	0,84 0,90	1—10	1—100	—

пульсном режиме, чем в непрерывном, и позволяют получать большие значения энергии в импульсе. Твердотельные лазеры работают с оптической накачкой, что сильно уменьшает их к. п. д.

В полупроводниковых лазерах в качестве активных материалов используется целый ряд полупроводниковых соединений — арсенид галлия, фосфид-арсенид галлия и др. Излучение полупроводниковых лазеров лежит преимущественно в видимой и ближней инфракрасной области.

Среди газовых лазеров наиболее распространенным стал лазер на смеси гелия и неона. Часто активными средами служат также аргон, криpton, углекислый газ и т. д. Диапазон излучения газовых лазеров простирается от субмиллиметровых волн до ультрафиолетовой части спектра. В области видимого света наиболее мощный лазер — аргоновый. Он позволяет получать в непрерывном режиме до сотен ватт на ряде линий в синей и зеленой области спектра.

Особое место занимают лазеры на колебательно-вращательных переходах молекул, т. е. молекулярые лазеры. Они работают в инфракрасном диапазоне. Наиболее известен лазер на CO₂. К. п. д. его доходит до 30% и превосходит к. п. д. всех существующих лазеров, работающих при комнатной температуре. Эти лазеры отличаются рекордно высокой мощностью излучения; так, в непрерывном режиме получена мощность излучения до нескольких киловатт, в импульсном — миллионы киловатт. Лазеры на CO₂ дают излучение с длиной волны 10,6 мм и 9,6 мм.

К. п. д. лазера. Не вся энергия накачки используется в лазере эффективно. Часть ее теряется на спонтанное излучение, безызлучательные переходы, на различного рода утечки. Отношение энергии когерентного излучения во внешнюю среду к затраченной энергии накачки есть коэффициент полезного действия лазера. На величину к. п. д. влияет скоп-

рость отвода тепла от активной среды. Дело в том, что нижние уровни, на которые происходят вынужденные переходы, необходимо освобождать от электронов, иначе нарушится инверсия населенности. Это можно сделать, создав, например, благоприятные условия для столкновения атомов со стенками газоразрядной трубы в газовых лазерах. В твердотельных же освобождающаяся при этом энергия передается решетке кристалла. В обоих случаях выделяющуюся в виде тепла энергию необходимо отводить.

На к. п. д. лазера с оптической накачкой влияет степень селективности излучения источника возбуждения: при ис-

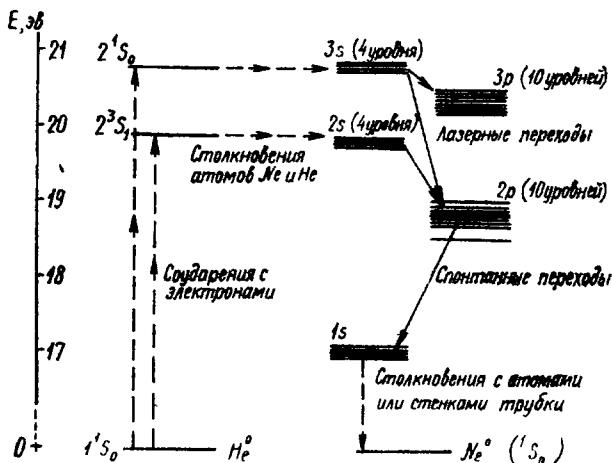


Рис. 13. Схема энергетических уровней гелий-неонового лазера

пользовании немонокроматического света его энергия передается большому числу уровней. При этом подводимая энергия лишь в незначительной степени расходуется на создание и поддержание инверсии.

Гелий-неоновый лазер. Одним из наиболее распространенных газовых лазеров является лазер, работающий на смеси гелия и неона. В газоразрядной трубке устанавливается давление гелия ~ 1 мм рт. ст., давление неона $\sim 0,1$ мм рт. ст. Накачка осуществляется за счет тлеющего разряда. Под действием электрического поля часть атомов гелия и неона ионизируется. Образуются положительные ионы и свободные электроны. В результате столкновений с электронами газоразрядной плазмы часть атомов возбуждается. (На рис. 13 приведена схема уровней энергии атомов неона и гелия). Атомы гелия переходят из основного состояния в метастабильное — 3S_1 или 1S_0 (см. приложение 1). Энергии

возбужденных уровняй гелия 1S_0 и неона $3s$ (см. приложение 2) почти одинаковы, то же самое относится и к уровням 3S_1 и $2s$. Это приводит к тому, что при неупругих столкновениях возбужденных атомов гелия и атомов неона в основном состоянии происходит «передача возбуждения». Атомы неона переходят в состояния $2s$ и $3s$. Населенности уровней $2s$ и $3s$ по сравнению с $2p$ и $3p$ возрастают. Инверсия населенности приводит к возможности лазерных переходов.

Структура возбужденных уровней неона такова, что уровни $2s$ и $3s$ содержат по четыре подуровня, а $2p$ и $3p$ — по десять подуровней каждый. Из-за большого числа подуровней разрешенных переходов может быть около 30. Наиболее интенсивные линии излучения соответствуют переходам:

$$2s_2 \rightarrow 2p_4, \quad \lambda = 1,15 \text{ мкм},$$

$$3s_2 \rightarrow 3p_4, \quad \lambda = 0,63 \text{ мкм},$$

$$3s_2 \rightarrow 2p_4, \quad \lambda = 3,39 \text{ мкм}.$$

На практике наиболее часто возбуждают переход $3s_2 \rightarrow 3p_4$, хотя он и наименее интенсивный из трех перечисленных. Это связано с тем, что излучение, соответствующее этому переходу, лежит в видимом диапазоне (красный свет).

С нижних уровней $2p$ и $3p$ атомы неона спонтанно переходят на метастабильный уровень $1s$. Уменьшение населенности на этом уровне можно создать путем увеличения числа столкновений с другими атомами или со стенками трубы. С этой целью диаметр трубы выбирается до 2 см при длине трубы 100 см.

Приложение

1. Основное состояние атома обозначается в виде терма

$$(2S+1)A_I$$

(предполагается, что в основном состоянии преобладает межэлектронное взаимодействие), где S — суммарный спиновый момент всех электронов данного атома; I — суммарный общий момент; $I = L + S$; L — суммарный орбитальный момент электронов; A — символ состояния атома: состояние с $L = 0$ обозначается буквой S , с $L = 1$ — буквой P , с $L = 2 - D$ и так далее.

Электронная конфигурация (запись последовательного заполнения электронных оболочек у данного атома) для гелия $1s^2$.

Полностью заполнена оболочка $1s$, это означает, что $L = 0$, $S = 0$, а тогда $2S + 1 = I$, $I = 0$. Если это s оболочка, то $A = S$. Итак, для атома гелия основное состояние 1S_0 .

Рассмотрим возбужденное состояние гелия, соответствующее переходу одного электрона с оболочки $1s$ на оболочку $2s$. В этом случае возможны два варианта взаимного расположения спина электрона на $1s$ и $2s$ орбитах. Параллельные спины будут соответствовать полному спину $S = 1$, антипараллельные — $S = 0$. Соответственно нижними возбужденными термами

атома гелия являются 3S_1 и 1S_0 (во избежание путаницы основное состояние обозначают 1S_0 , а возбужденные — 2S_1 и 2S_0).

2. Электронная конфигурация для основного состояния неона $1s^2 2s^2 2p^6$. Терм основного состояния 1S_0 (оболочка p заполнена полностью и $L = 0$, $S = 0$).

Электронная конфигурация, соответствующая возбужденному состоянию при переводе одного из электроионов на более высокие s или p оболочки, будет $1s^2 2s^2 2p^5(2+i)s$ или $1s^2 2s^2 2p^5(2+i)p$, где $i = 1, 2, 3, 4, \dots$. Для нижних возбужденных состояний в тексте используются обозначения Пашена как наиболее распространенные именно для неона. Состояние, соответствующее $1s^2 2s^2 2p^5(2+1)s$, обозначается как $1s$, а $\dots (2+2)s$ — как $2s$ и т. д., аналогично вводятся $1p$, $2p$, $3p$ и т. д. Можно показать, что все s состояния имеют по четыре подуровня, а p — по десять подуровней.

Оптические квантовые генераторы ЛГ-36 и ЛГ-75

Оптические квантовые генераторы ЛГ-36 и ЛГ-75 предназначены для использования в качестве источников когерентного излучения и для проведения научных исследований. Длина волны излучения 632,8 нм. Мощность излучения в многомодовом режиме не менее 40 мВт у ЛГ-36 и не менее 25 мВт у ЛГ-75. Прибор состоит из оптического квантового генератора (рис. 14, а) и стабилизатора напряжения СБП-11, выполненного в виде отдельного блока (рис. 14, б).

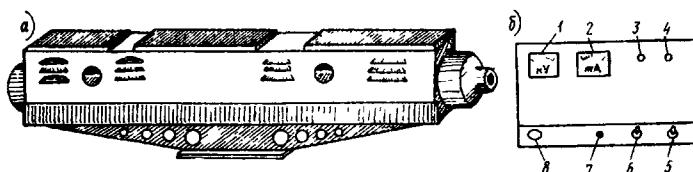


Рис 14. Лазер ЛГ-75. а — общий вид лазера; б — лицевая панель его блока питания СБП-11

Оптические резонаторы ОКГ типа ЛГ-36 и ЛГ-75 образованы плоским и сферическим зеркалами. Активный элемент — газоразрядная трубка, заполненная смесью гелия и неона. Торцы разрядной трубки отшлифованы под углом Брюстера и закрыты выходными окнами из кварцевого стекла. Конструктивно и технологически удобнее располагать зеркала резонатора вне трубки. При этом необходимо уменьшить потери излучения на торцах трубки, в основном возникающие за счет отражения от поверхности торцевых окон. Известно, что если падающее излучение поляризовано так, что плоскость поляризации совпадает с плоскостью падения, то коэффициент отражения

$$\rho_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(i - i')}{\operatorname{tg}^2(i + i')} ,$$

где i и i' — углы падения и преломления. Коэффициент отражения ρ_1 минимальен, если $i + i' = \pi/2$, т. е. $\operatorname{tg}(i + i') \rightarrow \infty$, а $\rho_1 \rightarrow 0$. С учетом закона преломления величина угла i определяется как $\operatorname{tg} i = n$; такой угол i называется углом Брюстера. Итак, если ось трубы и нормаль к торцевой пластине составят угол Брюстера, то потери на отражение будут минимальны. При отражении под углом Брюстера мы автоматически зададим определенный тип поляризации, а именно — плоскость поляризации должна совпасть с плоскостью падения.

Активный элемент ОКГ поджигается при быстром разряде конденсатора на первичную обмотку трансформатора поджига. Во вторичной обмотке этого трансформатора индуцируется высоковольтное, высокочастотное напряжение (для ЛГ-36 $U = 18 - 20$ кВ, для ЛГ-75 $U = 10$ кВ), прикладываемое к катоду и наружному электроду активного элемента ОКГ.

Общий тип стабилизатора напряжения для ЛГ-36 и ЛГ-75 приводит к однотипной схеме работы с приборами.

На передней панели блока стабилизатора напряжения (рис. 14, б) расположены:

индикаторные приборы для индикации значения тока ИП1 (2) и для индикации выходного напряжения ИП2 (1);

тумблер 5 — «сеть», тумблер 6 — «высокое» и соответствующие им сигнальные лампочки 4 и 3;

ручка потенциометра 8 — «регулировка напряжения».
кнопка 7 — «Поджиг».

Подготовка прибора к работе

1. Поставить тумблеры «Сеть» и «Высокое» в положение «Выкл.».

2. Вывести ручку «Регулировка напряжения» в крайнее левое положение.

Порядок включения прибора

1. Подать напряжение сети питания на стабилизатор напряжения.

2. Включить тумблер «Сеть». При этом должна загореться сигнальная лампочка.

3. Прогреть лампы стабилизатора напряжения и газоразрядную трубку оптического квантового генератора в течение 3—5 минут.

4. Перевести ручку «Регулировка напряжения» в крайнее правое положение.

5. Включить тумблер «Высокое». При этом должна загореться другая сигнальная лампочка.

ВНИМАНИЕ! При переводе тумблера «Высокое» в положение «Высокое» выходное напряжение холостого хода для ЛГ-36 3500 В, для ЛГ-75 — 2300 В.

6. Включить кнопку «Поджиг».

7. Ручкой «Регулировка напряжения» установить ток разряда, соответствующий максимальной мощности излучения оптического квантового генератора (примерно среднее положение стрелки миллиамперметра).

Оптический квантовый генератор ЛГ-55

Газовый оптический квантовый генератор ЛГ-55 предназначен для использования в качестве источника монохроматического когерентного излучения. Длина волны излучения 632,8 нм, мощность излучения 5 мВт. Прибор состоит из газового оптического квантового генератора ЛГ-55 и блока питания СБП-5.

ОКГ состоит из оптического резонатора, активного элемента и кожуха. Оптический резонатор образован сферическим и плоским зеркалами. Активный элемент — газоразрядная трубка, заполненная смесью гелия и неона. Торцы трубки отшлифованы под углом Брюстера и закрыты выходными окнами из оптического кварцевого стекла. Блок питания СБП-5 представляет собой стабилизатор тока. При нажатии кнопки «Поджиг» конденсатор, предварительно заряженный до напряжения порядка 250 В, разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора поджига. Со вторичной обмотки трансформатора высоковольтный (более 10 кВ) поджигающий импульс подается на внешний поджигающий электрод разрядной трубки ОКГ. Стабилизатор тока СБП-5 выполнен конструктивно в виде отдельного блока. На передней панели прибора (рис. 15) расположены: измерительный прибор ИП — «Ток нагрузки» 4; тумблер «Сеть» 1, сигнальная лампочка 5; ручка потенциометра 3 — «Регулятор тока нагрузки»; кнопка «Поджиг» 2.

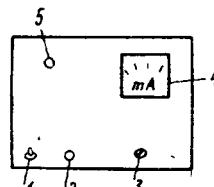


Рис. 15. Лицевая панель блока питания СБП-5 лазера ЛГ-55

При подготовке к работе необходимо выполнить следующие операции:

1. Поставить тумблер «Сеть» в нижнее положение.
2. Поставить ручку «Регулятор тока нагрузки» в крайнее левое положение.

Подготовка прибора к работе

1. Поставить тумблер «Сеть» в нижнее положение.
2. Поставить ручку «Регулятор тока нагрузки» в крайнее левое положение.

Порядок включения прибора

1. Вставить вилку сетевого шнура стабилизатора СБП-5 в сетевую розетку.
2. Перевести тумблер «Сеть» в верхнее положение. При этом должна загореться сигнальная лампочка.
3. Прогреть лампы стабилизатора тока СБП-5 и газоразрядную трубку оптического квантового генератора в течение 3—5 мин.
4. Поставить ручку «Регулятор тока нагрузки» в среднее положение.
5. Включить кнопку «Поджиг».
6. Ручкой «Регулятор тока нагрузки» установить ток разряда, соответствующий максимальной мощности излучения (примерно среднее положение стрелки на шкале миллиамперметра).

Порядок выключения прибора

Вывести ручку «Регулятор тока нагрузки» в крайнее левое положение.

Перевести тумблер «Сеть» в нижнее положение.

Вынуть сетевой шнур из розетки.

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники излучения — приборы для преобразования энергии электромагнитного излучения оптического диапазона в другие виды, удобные для измерения. По принципу действия приемники делятся на три основные группы: тепловые, фотоэлектронные (фотоэлектрические) и photoхимические.

К тепловым относятся термоэлементы, терморезисторы (в частности, болометры) и др. Их работа основана на тепловом действии излучения и поэтому они наиболее эффективны в инфракрасной области спектра.

Фотоэлектронные приемники делятся на приемники с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы) и с внешним фотоэффектом (вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи).

Photoхимические приемники (глаз, фотопленка) преобразуют в результате химической реакции энергию излучения в видимое изображение.

В лабораторном практикуме чаще всего используются фотоэлектронные приемники излучения.

Приемники с внешним фотоэффектом

Вакуумный фотоэлемент. Обычно это — стеклянная колба, на внутреннюю поверхность которой нанесен фоточувствительный слой (фотокатод). В центре колбы расположен анод. Воздух из колбы откачен. При освещении фотокатода электроны вылетают из него и устремляются к аноду, имеющему положительный по сравнению с катодом потенциал. Возникает фототок, который служит мерой светового потока, падающего на катод. Для характеристики фотокатодов служат следующие величины:

1) Спектральная чувствительность S_λ — отношение фототока I_Φ в режиме насыщения (в амперах) к потоку энергии монохроматического излучения с длиной волны λ (в ваттах):

$$S_\lambda = I_\Phi / P_\lambda.$$

2) Квантовый выход материала фотокатода η — отношение количества вылетевших фотоэлектронов к числу поглощенных фотонов:

$$\eta = N_e / N_\Phi.$$

3) Спектральная характеристика чувствительности (рис. 16), она может иметь один или несколько максимумов и обрывается при λ_0 (длинноволновый порог фотоэффекта), λ_0 — максимальная длина волны излучения, способного возбудить электроны. Эта величина определяется из соотношения

$$\lambda_0 = hc/e\phi,$$

где ϕ — работа выхода электронов из катода; h — постоянная Планка; e — заряд электрона; c — скорость света в вакууме.

4) Интегральная чувствительность S — отношение полного фототока (в микроамперах) к световому потоку (в люменах) от стандартного источника.

5) Темновой ток — ток через фотоэлемент без освещения фотокатода; темновой ток обусловлен термоэлектронной эмиссией с катода.

Основные параметры наиболее часто применяемых фотокатодов приведены в табл. 2.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). В фотоумножителе, как и в вакуумном фотоэлементе, излучение падает на фотокатод. Но в этом приборе происходит внутреннее усиление фототока, основанное на явлении вторичной электронной

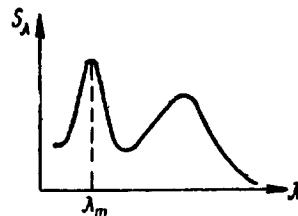


Рис. 16. Спектральная характеристика чувствительности фотокатода

Таблица 2

Тип	$\lambda_m, \text{ \AA}$	η_m	$\lambda_0, \text{ \AA}$	$S, \text{ мкА/лм}$	$I_T, \text{ А/см}^2$
Ag—O—Cs	8000—8500	0,005	12 000—15 000	20—60	10^{-13} — 10^{-11}
Sb—Cs	4200—4800	0,20—0,30	6000—7000	60—100	10^{-15}
Sb—Cs—O	4400	0,18—0,20	7500	100—180	10^{-14}
Bi—Cs—O	3800	0,01	7500	15—30	—
Bi—Ag—O—Cs	4500—5000	0,10	7500—8000	30—115	10^{-14} — 10^{-13}
Sb—Li	3700	—	6200	25—40	$< 10^{-16}$
Sb—Na, K	3700	0,25	6700	30—60	$< 10^{-16}$
Sb—Na, K—Cs	4400	0,35—0,40	8700—9000	150—250	10^{-16}

Примечание. λ_m и η_m соответствуют оптимальному режиму.

эмиссии: ускоренный полем электрон, попадая на поверхность твердого тела, вызывает эмиссию электронов из него. Для некоторых веществ количество таких вторичных электронов N' больше числа падающих N . Отношение N' к N носит название коэффициента вторичной эмиссии $\sigma = N'/N$. Величина σ зависит от энергии падающих электронов, угла падения электронов на поверхность, температуры поверхности твердого тела и т. д.

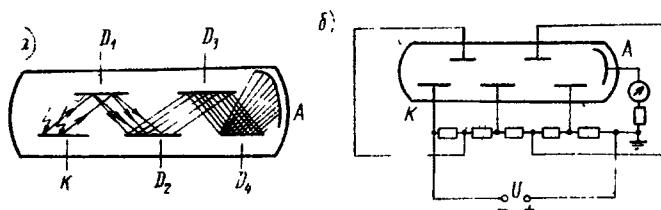


Рис. 17. Фотоэлектронный умножитель: *а* — устройство; *б* — схема включения

В фотоумножителях используется несколько электродов, называемых динодами, с поверхности которых выбиваются вторичные электроны (рис. 17, *а*). Расположены они так, чтобы максимальное число вылетающих с одного динода электронов попало на следующий динод. К динодам прикладываются положительные потенциалы, возрастающие от одного к другому. Электроны фокусируются и ускоряются этим электрическим полем. Вторичные электроны с каждого динода ускоряющим полем направляются на следующий динод, где выбивают еще большее число вторичных электронов. Этот процесс повторяется в каждой паре электродов. Происходит последовательное нарастание электронного тока, который в цепи анода уже в миллионы раз превышает первичный фототок.

Схема включения фотоэлектронного умножителя приведена на рис. 17, б. Источник питания должен давать достаточно стабильное напряжение 1—2 кВ при токе до нескольких миллиампер.

Фотоэлектронные умножители характеризуются следующими параметрами:

1) коэффициент усиления; коэффициент усиления одного каскада ФЭУ определяется коэффициентом вторичной электронной эмиссии α и тем, какая часть эмиттированных электронов α достигает следующего дниода $k_1 = \alpha\sigma$. Для современных ФЭУ $\alpha = 0,7—0,9$. Для ФЭУ с n каскадами $k = (\alpha\sigma)^n$. Величина σ зависит от приложенного напряжения U , регулируя его, можно в широких пределах изменять усиление ФЭУ. Величина фототока на выходе ФЭУ определяется соотношением

$$I_\phi = I_0 (\alpha\sigma)^n,$$

где I_0 — первичный фототок с поверхности катода.

2) чувствительность; различают два вида чувствительности ФЭУ: *анодная* чувствительность определяется как отношение выходного тока к световому потоку, падающему на фотокатод; единица измерения анодной чувствительности — ампер/люмен (A/lm);

пороговая чувствительность определяется как наименьший световой поток, который может быть зарегистрирован ФЭУ. Основными параметрами, определяющими пороговую чувствительность ФЭУ, являются квантовый выход фотокатода и величина темнового тока (термоэлектронная эмиссия с неосвещенного фотокатода).

С помощью ФЭУ трудно обнаружить световые потоки, меньшие 10^{-13} лм, что соответствует пороговой чувствительности порядка нескольких сотен фотонов в секунду.

Приемники с внутренним фотоэффектом

Фотодиод представляет собой полупроводниковый прибор, действие которого основано на возникновении фотоэ. д. с при освещении $p-n$ перехода (вентильный фотоэффект). Обычно фотодиод изготавливается так, чтобы свет падал перпендикулярно границе раздела p и n полупроводников, проходя через тонкий p слой (рис. 18). Свет вблизи поверхности возбуждает электроны, переводя их из валентной зоны в зону проводимости. Образуются пары электрон — дырка. Толщина p слоя невелика, так что $p-n$ переход залегает на расстоянии от освещаемой поверхности, гораздо меньшем диффузионной длины электромов. Поэтому все избыточные электроны (т. е. генерируемые светом) достигают $p-n$ перехода

и под действием контактного поля переходят в n область (рис. 19). Дырки задерживаются контактным полем и остаются в p области. Накопление в n области избыточных электронов, а в p области избыточных дырок частично компенсирует объемный заряд в области $p - n$ перехода, а это значит, что создается электрическое поле, противоположное первоначальному (т. е. снижается потенциальный барьер). Между p и n областями возникает фотоз. д. с. Концентрация образованных светом избыточных носителей тока у $p - n$ перехода, а значит, и величина фотоз. д. с. зависят от интенсивности падающего света.

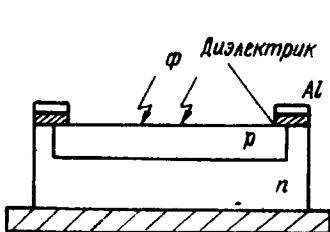


Рис. 18. Устройство фотодиода

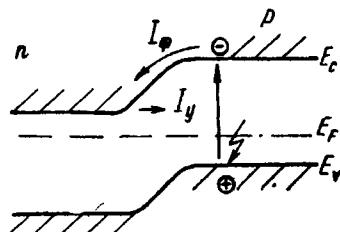


Рис. 19. Образование фототока на $p - n$ переходе

Если внешнюю цепь замкнуть, в цепи появится ток, состоящий из двух частей: избыточных носителей (фототок) и основных носителей, получивших возможность проходить через $p - n$ переход в результате снижения потенциального барьера (ток утечки).

Обычно используются два режима работы такого прибора:

1) Вентильный режим — при разомкнутой внешней цепи ($R_{\text{вн}} \rightarrow \infty$) прибор дает максимальную фотоз. д. с., при короткозамкнутой ($R_{\text{вн}} = 0$) — максимальный фототок (схема включения прибора и его характеристики при различной освещенности приведены на рис. 20).

2) Фотодиодный режим — в цепь прибора включается дополнительный источник э. д. с. V в запорном направлении (рис. 21). Такой режим чаще используется для регистрации световых сигналов, так как обладает большей чувствительностью к свету. Величина V практически не влияет на фототок. В то же время при достаточно большом значении V можно значительно уменьшить темновой ток. В этом состоит преимущество фотодиода перед фотосопротивлением.

На вольт-амперных характеристиках (рис. 20, б и 21, б) величина U — напряжение между электродами фотоэлемента, если они замкнуты на внешнюю нагрузку. Различным значениям $R_{\text{вн}}$ соответствуют различные U .

Преимущество фотодиода перед ФЭУ заключается в том, что он стабильнее ФЭУ, обладает меньшими размерами и

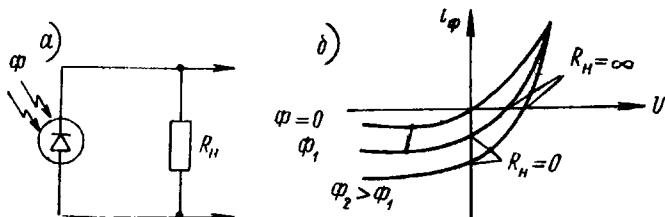


Рис. 20. Схема включения (а) и характеристики (б) фотодиода в вентильном режиме

весом. Для питания фотодиода требуется всего примерно 15 В, в то время как для ФЭУ ~ 1000 В.

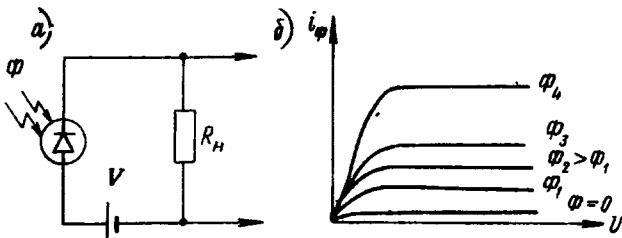


Рис. 21. Схема включения (а) и характеристики (б) фотодиода в фотодиодном режиме

Фототранзистор. По своему устройству фототранзистор — обычный $p-n-p$ или $n-p-n$ транзистор, имеющий коллектор, базу и эмиттер (рис. 22). Освещается обычно база.

Работает фототранзистор по принципу обычного транзистора, в котором роль управляющего тока играет попадающее на базу излучение. При освещении в базе возникают пары электрон — дырка. Дифундируя, они подходят к коллекторному $p-n$ переходу и разделяются на его потенциальной барьере. Коллекторный токрастет. Благодаря усилиению в транзисторе ток во внешней цепи сильнее реагирует на освещение, чем в фотодиоде.

Фототранзисторы имеют высокую чувствительность ($0,1 - 0,5$ А/лм).

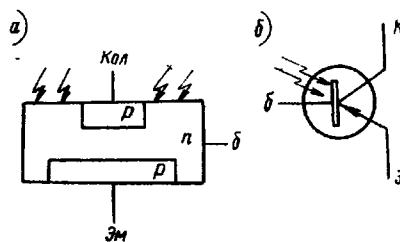


Рис. 22. Устройство (а) и условие обозначение (б) фототранзистора

Характеристики и параметры приемников с внутренним фотоэффектом:

1. Сопротивление приемника — это сопротивление чувствительного слоя при отсутствии облучения. Фотодиоды и фототранзисторы характеризуются динамическим сопротивлением, равным отношению напряжения сигнала к величине изменения фототока при заданной освещенности слоя:

$$R_d = \Delta U / \Delta I_\phi,$$

где ΔI_ϕ — приращение тока через приемник, соответствующее падению напряжения на нем

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Значение R_d вычисляется из вольт-амперной характеристики.

2. Шумы приемников — флуктуации напряжения в цепи приемника, т. е. случайные сигналы с переменной амплитудой и частотой.

Основные виды шумов:

тепловые шумы, вызываемые хаотическим тепловым движением свободных электронов, U_T ;

токовые шумы, вызываемые изменением сопротивления цепи при протекании темнового тока, U_i ;

температурные шумы, которые возникают при изменении температуры приемника в результате теплообмена между приемником и окружающей средой (теплообмен приводит к появлению некоторого изменяющегося во времени излучения), U_ϕ . Общее среднеквадратичное значение величины шумов приближенно определяется как

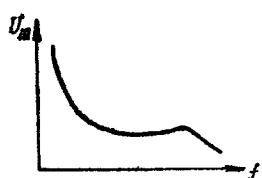


Рис. 23. Зависимость шумов фотоприемника от частоты

Для практического использования приемников важно знать не только среднее значение величины шумов, но и распределение их по частотам (спектр). На рис. 23 показана

форма кривой изменения U_{sh} в зависимости от частоты f . При низких частотах преобладают токовые шумы, на средних — тепловые вместе с токовыми, а на высоких (десятка килогерц) — тепловые. Значит, можно выбрать частоту модуляции светового потока таким образом, чтобы значение собственных шумов приемника было наименьшим.

3. Порог чувствительности — минимальное значение потока излучения, которое может обнаружить приемник. Обычно принимается за порог чувствительности такая интенсивность

падающего света, которая вызывает на выходе приемника сигнал, равный напряжению его шумов.

4. Интегральная чувствительность.

5. Относительная спектральная чувствительность — отношение чувствительности при данной длине волны к максимальной чувствительности данного приемника.

6. Постоянная времени τ — время, в течение которого выходной сигнал с приемника уменьшается в e раз.

Как уже отмечалось, для уменьшения уровня шумов применяют как можно более высокие частоты модуляции потока света. Однако верхний предел частоты модуляции зависит от постоянной времени.

7. Спектральная характеристика — изменение чувствительности приемника в зависимости от длины волны принятого монохроматического излучения.

Частотная характеристика — изменение чувствительности приемника в зависимости от частоты модуляции светового потока.

9. Температурная характеристика — зависимость чувствительности приемника от температуры чувствительного слоя.

10. Темновой ток I_T .

11. Величина фоточувствительной площади A и еще ряд характеристик.

На рис. 24 приведены спектральные характеристики фотодиодов на основе Ge (1) и Si (2). В табл. 3 представлены параметры некоторых фотодиодов, используемых в оптических приборах.

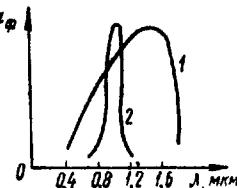


Рис. 24. Спектральные характеристики фотодиодов на основе германия (1) и кремния (2)

Таблица 3

Тип	I_T , мкА	S	τ , с	A , мм^2	$\lambda_{\text{макс.}}$, мкм
ФД-3	1,5	$>3,7 \cdot 10^{-2}$ мкА/лк *		2	1,7
ФД-7Г	$<10,0$	>22 мА/лм		2,5	1,7
ФД-7К	$<5,0$	$>0,47$ мкА/лк		78,5	1,1
ФД-8Г	$<10,0$	>17 мА/лм	$1,2 \cdot 10^{-7}$	3,5	1,7
ФД-1	3,0	20 мА/лм		0,8	—
ФД-2	25,0	10—20 мА/лм		4,9	—
ФДК-1	3,0	3,0 мА/лм		—	—

* лк = лм/м², т. е. световой поток, приходящийся на единицу освещаемой поверхности.

ДИСПЕРГИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Диспергирующими элементами оптических приборов называются элементы, осуществляющие разложение электромагнитного излучения оптического диапазона на монохроматические составляющие. Обычно в качестве таких элементов используются призмы и дифракционные решетки.

Призмы

Разложение света трехгранный призмой объясняется зависимостью показателя преломления материала призмы от длины волны излучения (дисперсия света). Свет, проходя через призму, меняет свое направление, причем угол выхода его из призмы зависит от длины волны (рис. 25, а).

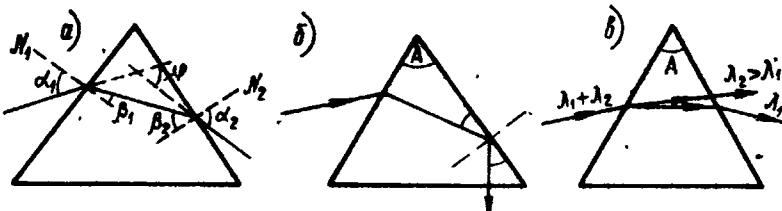


Рис. 25 Прохождение света через призму: а — преломление светового луча в призме; б — ход луча при условии полного внутреннего отражения; в — преломление в призме света различных длин волн

При падении на грань призмы монохроматического светового луча под углом α_1 к нормальну первой грани призмы выходящий луч оказывается отклоненным от начального на угол ϕ . Как видно из рисунка,

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 - (\beta_1 + \beta_2); \quad A = \beta_1 + \beta_2,$$

где β_1 — угол преломления луча; β_2 — угол его падения на вторую грань; α_2 — угол выхода луча из призмы. Угол при вершине A называется преломляющим. Если преломляющий угол больше предельного A_{\max} , то любой луч, вошедший в призму, попадает на вторую грань под углом, большим, чем угол полного внутреннего отражения. Тогда луч не выходит из призмы через вторую грань (рис. 25, б).

Условия, при которых угол отклонения ϕ имеет минимальное значение, определяются следующими соотношениями:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0; \quad \sin \alpha_0 = n \sin \frac{A}{2} = \sin \frac{A + \phi}{2}.$$

Если на призму падает свет, состоящий из волн различных частот, дисперсия света приведет к тому, что углы вы-

хода их из призмы окажутся различными. Явление дисперсии легко понять, если вспомнить, что показатель преломления вещества есть отношение скорости распространения света в вакууме к фазовой скорости света в веществе $n = c/v$. Фазовая скорость прохождения электромагнитной волны в среде v (т. е. скорость движения ее «гребней») определяется диэлектрическими и магнитными свойствами этой среды:

$$v = c/\sqrt{\epsilon\mu},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; μ — ее магнитная проницаемость.

Согласно классической электронной теории дисперсия света обусловлена взаимодействием его с заряженными частицами, входящими в состав вещества и совершающими вынужденные колебания в переменном электромагнитном поле волн. Для видимого света частота так велика ($\sim 10^{15}$ Гц), что существенны лишь вынужденные колебания внешних (наиболее слабо связанных) электроионов в атомах, молекулах или ионах. Эти электроны называются оптическими. В процессе вынужденных колебаний оптических электронов в поле монохроматической волны с частотой ω периодически изменяются электрические дипольные моменты молекул. Молекулы при этом излучают вторичные электромагнитные волны той же частоты ω . Скорость распространения вторичных волн равна c , а их фазы определяются формулой

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

где ω_0 — частота собственных колебаний электрона; ω — частота падающей волны; β — коэффициент затухания волны в среде. Наложение первичной и вторичной волн дает результирующую волну, опережающую или запаздывающую по фазе по сравнению с падающей волной. Этот сдвиг фаз воспринимается как изменение фазовой скорости волны в среде.* Его величина зависит от разности частот ω и ω_0 . Изменение фазовой скорости волны v приводит к изменению направления распространения волны в среде. Частота колебаний в пустоте и в среде одна и та же, но длина волны изменяется, так как $\lambda = 2\pi \frac{v}{\omega}$. Так как изменение скорости v в среде зависит от частоты падающей волны, то и направление луча в среде оказывается различным для разных ω (и λ).

* Изменение фазовой скорости здесь кажущееся, наблюдателю в точке наблюдения в среде, например, дольше ждать, чтобы фаза $E(t)$ приобрела определенное значение, чем в случае распространения света в вакууме. В этом случае он считает, что фазовая скорость меньше c .

Дисперсию призмы $\frac{dn}{d\lambda}$ можно определить из зависимости $n(\lambda)$ для данного вещества (дисперсионной кривой). Пример такой кривой для кристаллического кварца приведен на рис. 26.

Угловая дисперсия призмы $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ определяется соотношением

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{\sin A}{\cos \alpha_2 \cos \beta_1} \frac{dn}{d\lambda},$$

а в условиях минимального отклонения

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{T}{b} \frac{dn}{d\lambda},$$

где T — основание призмы; b — ширина падающего пучка света. Если угол $A = 60^\circ$, то

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \frac{dn}{d\lambda}.$$

Если две (или более) призмы установлены в условиях минимального отклонения друг за другом, то угловая дисперсия такой системы равна сумме дисперсий всех призм.

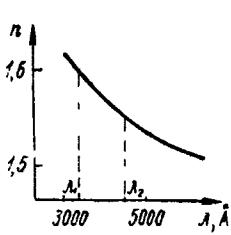


Рис. 26. Дисперсия кристаллического кварца

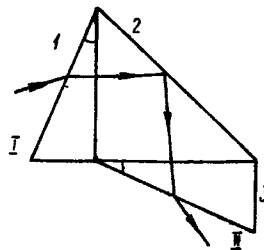


Рис. 27. Призма Аббе

Важной характеристикой призмы является ее разрешающая способность, т. е. отношение $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$, где $\delta\lambda$ — наименьшая разница длин волн двух монохроматических спектральных линий равной интенсивности, которые наблюдаются раздельно. Разрешающая способность призмы ограничивается дифракцией света на ее краях. Для призмы заданных размеров наибольшая величина R достигается в условиях наименьшего отклонения. На разрешающую способность призмы влияет и поглощение в ней света. При этом уменьшается общее количество энергии, пропущенной призмой. Поглощение света в разных частях призмы различно (у вершин меньше,

чем у основания, из-за разности пути). Лучи, проходящие вблизи основания призмы, не принимают участия в образовании изображения, что равнозначно уменьшению размеров, а значит, и разрешающей способности призмы. Поэтому стремится выбирать для изготовления призм материалы с малым коэффициентом поглощения. Этим условием определяется выбор материала для призм, работающих в различных областях спектра. Так, для видимой области используют стекло, для ультрафиолетовой — кристаллический кварц, для инфракрасной — LiF, NaCl, KBr.

Призма постоянного отклонения Аббе имеет сложную форму (рис. 27). Она склеена из двух призм 1 и 3 с преломляющим углом 30° и одной призмы 2 полного внутреннего отражения с углом 45° . Луч, преломленный призмой 1, поворачивается призмой 2 на угол 90° . В условиях минимального отклонения углы α_1 и α_2 равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку. Значит, угол отклонения луча равен 90° . Дисперсия света в призме Аббе происходит лишь на гранях I и II крайних призм, призма 2 — отражающая. Так как стекла, имеющие большую дисперсию, заметно поглощают энергию в ультрафиолетовой области, а длина хода лучей в призме велика, то отдельные части призмы изготавливают из различных материалов: диспергирующие призмы 1 и 3 обычно делают из стекла с большой дисперсией ТФ-1 (тяжелый флинт), а отражательную призму 2 — из легкого прозрачного стекла, например, К-8.

Склленные призмы любой конструкции используются, как правило, только в видимой области по той причине, что в ультрафиолетовой и инфракрасной областях известные в настоящее время клеящие вещества недостаточно прозрачны.

Дифракционные решетки

Дифракция — совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями. Этим явлением объясняется, в частности, огибание световых волнами препятствий с размерами, близкими к длине волны. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка препятствия, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн. Если свет проходит через отверстие, то каждая точка выделяемого отверстием участка волнового фронта служит центром вторичных волн.

Если на пути волн расположена решетка, имеющая ряд близких отверстий, то дифракция происходит на каждом отверстии. Вторичные волны, распространяющиеся от решетки, складываются (рис. 28). Если на пути волн, движущихся под углом ϕ от решетки, поставить линзу, то в ее фокальной пло-

скости получится интерференционная картина — спектр результирующих колебаний, который выглядит как ряд чередующихся полос. Максимумы интерференционной картины наблюдаются, когда разность хода лучей ($\Delta_2 - \Delta_1$) равна целому числу волн. Положение максимумов определяется формулой (основная формула решетки)

$$t(\sin \varphi - \sin \psi) = k\lambda,$$

где t — постоянная решетки, равная сумме ширины отверстия и ширины непрозрачного участка; φ — угол падения; ψ — угол дифракции; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Из этой формулы видно, что угол дифракции зависит от длины волны падающего света. Поэтому решетку можно применять в качестве диспергирующего элемента.

Решетка дает для каждой длины волны большое число спектров, соответствующих различным k . Число k определяет порядок спектра. При $k = 0$ получается спектр нулевого порядка, для которого $\sin \varphi = \sin \psi$, независимо от длины волны. Верхнее значение k ограничивается условием

$$|\sin \varphi - \sin \psi| \leq 2.$$

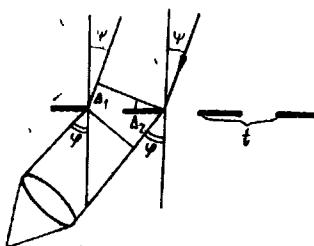
Значит, $k\lambda \leq 2t$ и максимальное значение k определяется как

$$k_{\max} \leq 2t/\lambda.$$

Чтобы решетка давала спектр хотя бы первого порядка, должно выполняться условие $t > \lambda/2$. Таким образом, для $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ постоянная решетки должна быть более 2500 \AA , т. е. решетка должна иметь менее 4000 штрихов на миллиметре. Современные решетки имеют от 600 до 2400 штр/мм.

Для области 10000 \AA решетка, имеющая 2400 штр/мм, уже не годится, так как с ее помощью невозможно наблюдать спектр даже первого порядка. Поэтому для более длинноволновой области приходится применять относительно грубые решетки, имеющие 300 штр/мм и менее.

Разрешающая способность решетки равна $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$, т. е. определяется, кроме порядка спектра, еще и общим количеством штрихов N . Увеличение числа штрихов решетки возможно только за счет уменьшения ее постоянной, так как увеличивать общие размеры всей решетки можно только в разумных пределах.



Если свет содержит составляющие с различными длинами волн, то в фокальной плоскости линзы получается линейчатый спектр, расстояние каждой линии которого от центра дифракционной картины пропорционально длине волны данной линии, т. е. возникает дисперсия света. Выражение для угловой дисперсии решетки можно получить, если продифференцировать основную формулу решетки по длине волны:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{t \cos \varphi}.$$

Значит, для увеличения угловой дисперсии нужно уменьшать постоянную решетки или увеличивать порядок спектра. В то же время эту формулу можно переписать в другом виде, используя основную формулу решетки:

$$D_\varphi = \frac{\sin \varphi - \sin \psi}{\lambda \cos \varphi},$$

т. е. при данных углах падения и дифракции дисперсия решетки не зависит от ее постоянной. При нормальном падении света на решетку ($\sin \psi = 0$) дисперсия принимает вид

$$D_\varphi = \operatorname{tg} \varphi / \lambda.$$

Итак, как видно из основной формулы решетки, одни и те же углы дифракции наблюдаются для всей совокупности длин волн λ , удовлетворяющих соотношению

$$t(\sin \varphi - \sin \psi) = \lambda_i k_i,$$

где k_i — вся последовательность натурального ряда чисел k , возможных для данной решетки.

Таким образом, если для наибольшей наблюдаемой длины волны спектр первого порядка расположен под углом φ к нормали, то под этим же углом наблюдается излучение с длиной волны $\lambda/2$ в спектре второго порядка, $\lambda/3$ — в спектре третьего порядка и т. д. В этом заключается основной недостаток решетки по сравнению с призмой. Спектры нужного порядка приходится каким-либо образом выделять (например, с помощью фильтров).

Часть энергии излучения, дифрагированного решеткой, отражается от нее, как от зеркала, без спектрального разложения, другая часть распределяется между спектрами различных порядков (рис. 29). Это распределение зависит от формы решетки.

Почти во всех решетках, применяемых для спектральных исследований, используется дифракция при отражении, так как прозрачные решетки обладают большим недостатком — зависимостью от длины волны коэффициента поглощения ма-

териала решетки. Отражательные решетки подчиняются тем же формулам, что и прозрачные.

У отражательных решеток с небольшим числом штрихов на миллиметр можно сделать штрихи такой формы, чтобы энергия сосредоточилась в узкой области углов дифракции, давая спектр одного порядка. Такие отражательные решетки, имеющие специальную ступенчатую форму (рис. 30), называются эшелеттами. Эшелетт состоит из одинаковых зеркальных площадок шириной b , плоскости которых параллельны друг другу и образуют угол γ с общей касательной плоскостью всех зеркальных элементов, т. е. с плоскостью заготовки, на которой нарезаются канавки. При падении на

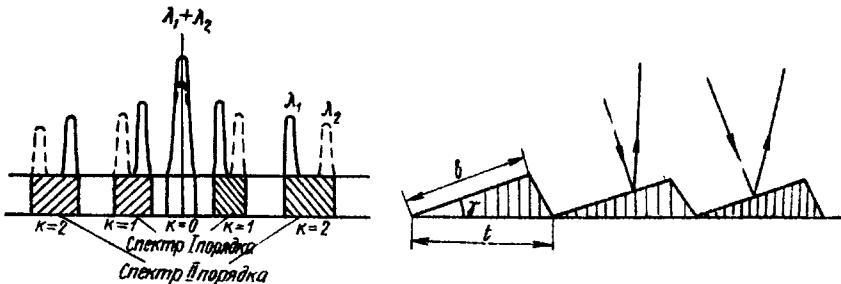
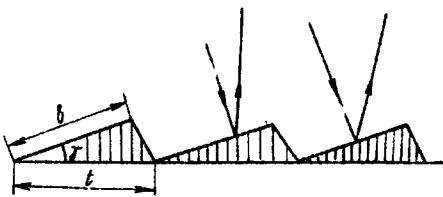


Рис. 29. Распределение энергии излучения между спектрами различных порядков от дифракционной решетки

Рис. 30. Эшелетт



эшелетт параллельного пучка лучей на каждой зеркальной площадке происходит дифракция, как на узкой щели, и пучки, дифрагированные на всех площадках, интерферируют.

В настоящее время наряду с нарезанными решетками используют реплики — копии дифракционных решеток. Реплика представляет собой отпечаток решетки — оригинала на пленке из пластмассы, который затем покрывают тонким слоем алюминия. Качество реплик иногда даже превышает качество решетки, так как пластмасса плохо передает мелкие дефекты штриха, поэтому на реплике он получается более сглаженным. Сейчас с одной решетки можно получить до сотни пластмассовых копий — реплик.

В последнее время появилась возможность изготавливать голографические решетки. Такая решетка представляет собой зарегистрированную интерференционную картину, образованную на светочувствительном материале двумя когерентными пучками света (источником служит лазер). После соответствующей химической обработки, аналогичной проявлению и фиксированию обычных фотопластинок, на поверхности подложки остаются полосы, форма и расстояние между

которыми определяются положением двух источников излучения относительно заготовки и длиной волны этого излучения. Затем поверхность покрывают в вакууме слоем металла, при этом получается отражательная голограммическая решетка, с которой потом можно изготавливать реплики, как с обычных решеток.

Плоские голограммические решетки с равноотстоящими параллельными штрихами получаются в результате интерференции двух параллельных пучков, падающих на заготовку под разными углами φ_1 и φ_2 (рис. 31). Расстояние t между соседними штрихами (перпендикулярными плоскости чертежа) определяется из условия, что разность хода пучков, падающих на участок поверхности, равна длине волны λ_0 излучения лазера:

$$t(\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) = \lambda_0.$$

Таким способом получают решетки с 1200 — 3000 штр/мм при размерах всей решетки до 300 мм.

Достоинства голограммических решеток — один порядок спектра, только первый; высокая разрешающая способность; отсутствие дополнительных линий, обусловленных в обычных решетках дефектами штрихов.

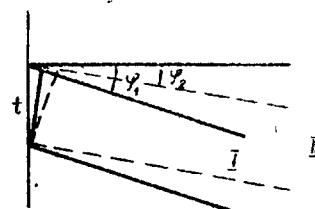


Рис. 31. Образование голограммической решетки

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТИПЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Спектральные приборы различаются по методу получения и регистрации спектра и рабочему диапазону длии воли. Однако принципиальная оптическая схема любого из них включает в себя одни и те же основные элементы (рис. 32).

Входная щель S освещается исследуемым излучением. Это — узкое отверстие переменной ширины, образованное двумя ножами. Оба ножа двигаются симметрично относительно центра щели.

Коллиматорный объектив L_1 преобразует расходящиеся от точечного источника лучи в параллельный пучок света. Входная щель находится в фокальной плоскости объектива.

Диспергирующий элемент D отклоняет лучи на различные углы, в зависимости от длины волны λ , превращая параллельный пучок лучей от каждой точки щели в веер монохроматических пучков.

Фокусирующий объектив L_2 (камерный объектив) собирает на своей фокальной поверхности P монохроматические пучки и создает на ней ряд монохроматических изображений щели — спектр.

Фокусирующая оптика L_1 и L_2 может быть и линзовой и зеркальной.

Широко распространена автоколлимационная схема, в которой один и тот же объектив является одновременно и коллиматорным и камериным (рис. 33).

Идеальным можно считать такой спектральный прибор, распределение энергии на выходе которого не зависит от его конструкции и особенностей, а определяется только свойства-

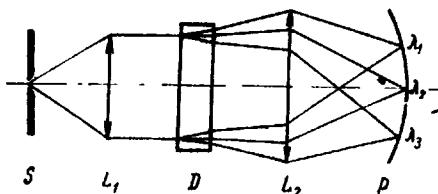


Рис. 32. Оптическая схема спектрального прибора

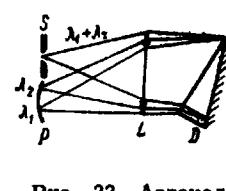


Рис. 33. Автоколлимационная схема

ми источника излучения. В реальных условиях и спектральный прибор и приемник излучения вносят в спектр искажения. Примером может служить хроматизм оптической системы, в состав которой входят линзы. Он связан с дисперсией света. Проявляется хроматизм двояко:

1) изображения точки, получающиеся от лучей света разной длины волн, могут лежать на различных расстояниях вдоль оптической оси системы, так как фокусное расстояние линзы зависит от показателя преломления материала линзы; это явление называется хроматизмом положения изображения, или продольным хроматизмом (результат — точка на оси изображается цветными кружками);

2) различие в величине фокусных расстояний означает различие в увеличении для разных длин волн, вследствие чего предметы конечных размеров дают изображения с цветной каймой; это явление называется хроматизмом увеличения.

Основные характеристики

Основными характеристиками спектральных приборов являются угловая и линейная дисперсия, светосила, разрешающая способность и область пропускания.

Угловая дисперсия определяется видом диспергирующего элемента. Линейная дисперсия $D_l = dl/d\lambda$ определяет линей-

ное расстояние между центрами монохроматических изображений щели, отстоящих на интервал $d\lambda$; это означает, что D_l — линейное расстояние на фокальной поверхности прибора, приходящееся на единичный спектральный интервал. Линейная дисперсия измеряется в мм/мкм.

Кварцевые призмы позволяют получать высокие значения угловой дисперсии D_ϕ в ультрафиолетовой области спектра, стеклянные — в сине-фиолетовой. В красной и ближней инфракрасной областях спектра значения дисперсии вещества $dn/d\lambda$ у всех материалов малы, и применение призм в этой области неэффективно. У дифракционных решеток угловая дисперсия мало меняется с длиной волны.

Разрешающая способность R характеризует способность спектрального прибора зарегистрировать раздельно две близкие спектральные линии. Ее количественной характеристикой является отношение длины волны света λ к расстоянию $\Delta\lambda$ между двумя близкими различимыми линиями равной интенсивности:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}.$$

В спектральном приборе, как и в любой оптической системе, происходит ограничение пучков света, образующих изображение. Например, световые пучки ограничиваются оправами линз объективов и краями призмы или решетки. Все преграды, ограничивающие направленные пучки света в оптической системе, называются действующими отверстиями. Разрешающая способность прибора определяется дифракцией света на действующем отверстии прибора (т. е. на наименьшем из действующих отверстий элементов схемы), шириной входной щели, погрешностью оптических деталей и относительной интенсивностью регистрируемых линий.

Светосилой спектрального прибора называется величина светового потока (количество световой энергии), прошедшего прибор и достигшего поверхности, регистрирующей спектр. Светосила различна для излучения разных длин волн. Она определяется характеристиками источника света, пропусканием прибора, его геометрией и условиями освещения входной щели. Пропускание прибора ограничено из-за потерь излучения на поглощение во всех элементах оптической схемы и на отражение от их поверхностей.

Типы спектральных приборов

Способ регистрации спектра, примененный в конкретном приборе, определяет его название.

Спектрографы

Спектрографом называется оптический прибор, предназначенный для фотографической регистрации спектра. Кассета с фотослоем совмещается в этом приборе с фокальной поверхностью камерного объектива. Для того чтобы получить на одной пластинке серию спектров, кассету перемещают перпендикулярно направлению дисперсии. Для определения длин волн в спектрографах имеется шкала, видимая в поле зрения прибора рядом со спектром или наложенная на него.

Спектрограф ИСП-51. Этот прибор предназначен для работы в видимой и ближней инфракрасной областях спектра

($\lambda = 0,36 - 1 \text{ мкм}$). Его оптическая схема (рис. 35, а) построена по трехпризменной системе Ферстерлинга (рис. 34). Она состоит из двух одинаковых равносторонних призм и расположенной между ними призмы постоянного отклонения Аббе. Все три призмы установлены в условиях минимального отклонения. Система дает постоянный угол отклонения 90° . При переходе от одной длины волны к другой нужно поворачивать призмы 1 и 3 на равные углы в противоположные стороны, а призму 2 — на утроенный угол в направлении вращения призмы 1.

В спектрографе ИСП-51 излучение от источника проходит через входную щель 1 и попадает на объектив коллиматора 2. Образованный им параллельный пучок лучей падает на систему призм 3. Разложенный пучок объективом камеры 5 или 6 фокусируется в плоскости 7, где размещена фотопластинка.

Прибор имеет две сменные камеры. Камера с объективом с фокусным расстоянием 120 мм дает разрешение $\Delta\lambda = 0,597 \text{ нм}$, камера с объективом 270 мм — $\Delta\lambda = 0,03 \text{ нм}$. Фокальная поверхность объективов обеих камер плоская для всего рабочего диапазона спектра.

Спектрограф состоит из трех самостоятельных частей: коллиматора, призменной части и камеры. В фокальной плоскости объектива коллиматора установлена входная щель 1 (рис. 35, б). Щель перемещается вдоль оптической оси вращением накатанного кольца 3, отсчет установки щели снимают по шкале 4 с ценой деления 0,09 мм. Пределы раскрытия щели от 0 до 0,4 мм, при цене деления на шкале 2 установочного барабана 0,001 мм. Высота рабочего участка щели

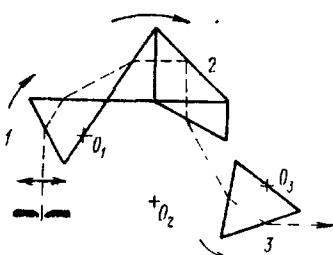


Рис. 34 Система Ферстерлинга

15 мм. Для регулировки положения оптической оси коллиматора в вертикальном и горизонтальном направлениях предусмотрены специальные винты 5 и 7. К щели прилагается диафрагма, позволяющая ограничивать высоту щели и получать соприкасающиеся спектры. На оправу щели можно надеть специальную насадку с призмой сравнения. Эта призма позволяет получить одновременно два соприкасающихся спектра от двух различных источников.

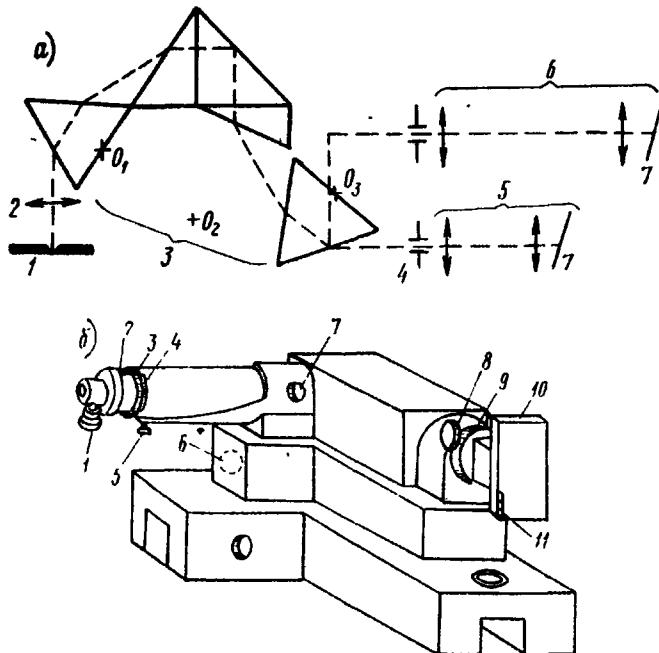


Рис. 35. Спектрограф ИСП-51: а — оптическая схема; б — внешний вид

Призменная система смонтирована на литом основании. Призмы установлены так, что при любом их положении луч, совпадающий с осью камеры, проходит через призмы в минимуме отклонения. Поворачиваются все три призмы одновременно с помощью микрометрического винта 6 с двумя шкалами: цена деления первой шкалы — один полный оборот микрометрического винта; второй — 0,01 от полного оборота винта. Сменные камеры прибора взаимозаменяемы и крепятся на нем зажимным винтом 9. Для получения резкого изображения спектра объективы камер фокусируются с помощью кремальерного механизма 8.

В кассетной части камеры на рамке 10 крепится кассета

или матовое стекло для визуального наблюдения спектра. Перемещается рамка с кассетой вручную, контроль за перемещением ведется по шкале 11. Для уменьшения влияния рассеянного света в прорезь кассетной части вставлена диафрагма прямоугольной формы.

Монохроматоры

Монохроматором называется спектральный прибор, выделяющий из интегрального излучения квазимонохроматическое, энергия которого распределена в достаточно малом интервале длин волн $\Delta\lambda$.

Оптическая схема любого монохроматора (рис. 36) содержит коллиматор с входной щелью S_1 и объективом L_1 , формирующим параллельный пучок лучей, диспергирующую систему D , фокусирующий объектив L_2 , в фокальной плоскости

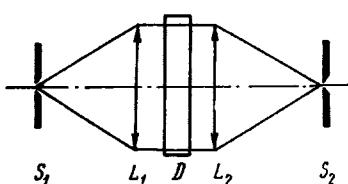


Рис. 36. Оптическая схема монохроматора

которого расположена узкая выходная щель S_2 . Эта щель выделяет узкую полосу из спектра исследуемого излучения. Перемещая щель вдоль спектра, можно выделять попеременно его различные участки. Такой процесс называется сканированием спектра. Обычно сканирование производится не

перемещением выходной щели, а поворотом диспергирующей системы D . Каждому фиксированному углу поворота системы D соответствует на выходе монохроматора излучение с определенной длиной волны.

Существуют различные конструкции монохроматоров, в зависимости от типа диспергирующей системы, вида фокусирующей оптики, рабочей области длин волн.

Призменный монохроматор УМ-2 предназначен для работы в видимой и ближней инфракрасной области спектра (от 0,38 до 1 мкм). Основой его оптической схемы служит призма постоянного отклонения Аббе из стекла ТФ-3 (рис. 37, б).

Максимальная ширина раскрытия входной и выходной щелей 4 мм, высота 15 мм. Спектр сканируется поворотом призмы.

Внешний вид УМ-2 показан на рис. 37, а. Все узлы монохроматора: коллиматор 7, призменный столик 3 и выходная труба 2 размещаются на одном основании с осветителем и приемником излучения. Входная щель коллиматора раскрывается поворотом барабана 10 с делениями, цена деления равна 0,01 мм. На входную щель можно надеть насадку 8

с линзой $F = 140$ мм и призмой сравнения, включаемой рукояткой 9. В насадку входит фигурная диафрагма. С помощью большого выреза диафрагмы щель ограничиваются по высоте; высота щели определяется по шкале с ценой деления 1,2 мм. Шкала нанесена на правой верхней части диафрагмы; отсчет снимается против края корпуса щели. Ножи входной щели установлены в фокальной плоскости объектива коллиматора. Так как фокусное расстояние объектива для разных длин волн различно, предусмотрена возможность фокусировки объектива. Положение объектива коллиматора определяется

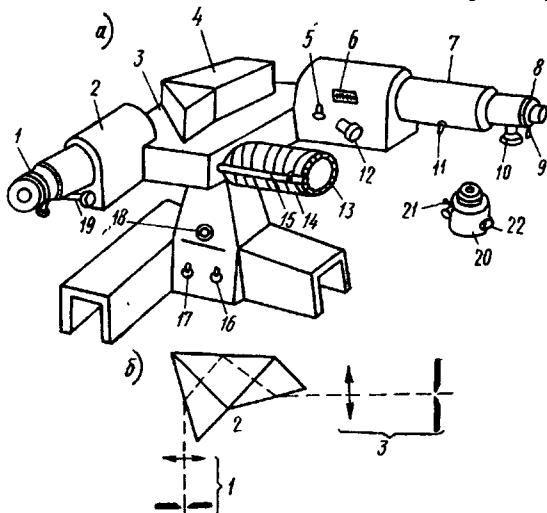


Рис. 37 Монохроматор УМ-2: а — внешний вид,
б — оптическая схема.
1 — входная система, 2 — призма Аббе; 3 — выходная система

по шкале 6 с индексом. Лампа 5 освещения шкалы включается тумблером 16. Фокусировка производится с помощью маховика 12. В трубе коллиматора между щелью и объективом помещен затвор, с помощью которого можно прекратить доступ света в прибор. Движением затвора управляют с помощью рукоятки 11.

Столик 3 с призмой 4 установлен на нижнем столике с рычагом, получающим движение от микрометрического винта 13 поворотного механизма. На барабане длин волн 14 поворотного механизма нанесены относительные деления — градусы. Значение длины волны отсчитывается против индекса 15, скользящего по спиральной канавке.

Объектив выходной трубы собирает лучи света в плоскости выходной щели 1, укрепленной в патрубке. Освободив маховик 19, можно вынуть патрубок со щелью и заменить его

патрубком 20 зрительной трубы со сменными окулярами. В фокальной плоскости окуляра зрительной трубы есть указатель с головкой 21, освещаемый лампочкой через сменные светофильтры 22. Спектральная линия, подведенная к указателю, должна попадать в выходную щель коллиматора, установленного вместо зрительной трубы. Освещение указателя включается тумблером 17, регулируется реостатом 18.

Монохроматор МДР-3 предназначается для работы в широком спектральном диапазоне от 0,2 до 2,2 мкм (вся видимая, часть ультрафиолетовой и инфракрасной областей).

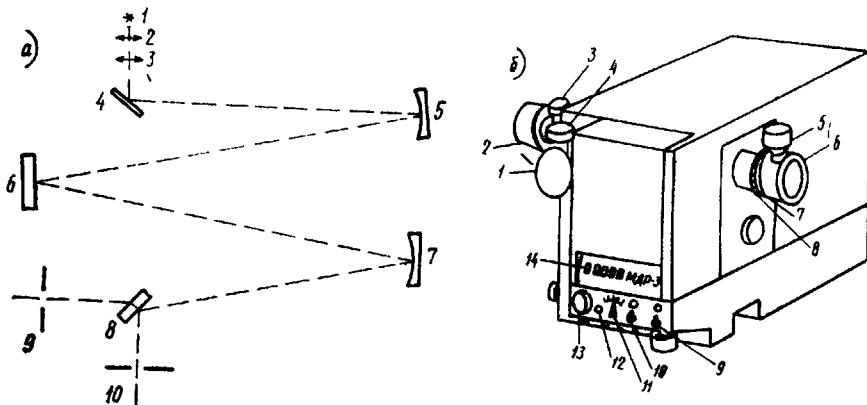


Рис. 38. Монохроматор МДР-3. а — оптическая схема; б — внешний вид

В качестве диспергирующего элемента в МДР-3 используется сменная дифракционная решетка (реплика) с 300, 600 или 1200 штр/мм.

Оптическая схема монохроматора построена по схеме Фасти с двумя сферическими зеркалами в качестве объективов (рис. 38 а). Свет от источника 1 через осветительную систему 2 попадает на входную щель 3. Поворотное зеркало 4 и зеркальный сферический объектив 5, в фокальной плоскости которого расположена входная щель, направляют параллельный пучок лучей на дифракционную решетку 6. После дифракции параллельный пучок направляется зеркальным сферическим объективом 7 и поворотным зеркалом 8 на одну из выходных щелей 9 или 10, расположенную в фокальной плоскости зеркала 7. Спектр сканируется поворотом дифракционной решетки вручную или автоматически от электродвигателя с различными скоростями: 1,6, 8, 40 или 192 нм/мин.

Решетки работают в первом порядке. Для срезания спектров высших порядков перед входной щелью устанавливается соответствующий светофильтр. Маховичок поворота дифракционной решетки расположен на боковой стенке прибора со

стороны выходной щели. Движение от маховичка передается на измерительный счетчик. Входная и выходные щели симметричны с максимальной шириной раскрытия 4 мм и высотой 15 мм. Цена деления соответствующего барабана 0,01 мм. Для дополнительной фокусировки каждую щель можно перемещать вдоль оптической оси в пределах 6 мм. Для перемещения щелей служат вращающиеся кольца.

На рис. 38, б представлен внешний вид монохроматора МДР-3: тубусы с входной щелью 6, выходными — 1 и 2. Ширина раскрытия щелей отсчитывается по шкалам барабанчиков 5 — входной щели, 3 и 4 — выходных щелей. Кольца перемещения щелей 7. Величина перемещения отсчитывается со шкалой 8 соответственно для каждой щели. Свет направляется в одну из выходных щелей рукояткой, находящейся под щелью. При работе с одной выходной щелью вторая закрывается крышкой.

Определение длины волны участка спектра, выходящего из выходной щели, производится по шкале счетчика 14, отградуированного для решетки 600 штр/мм. При установке других решеток в показания счетчика нужно вводить коэффициент 0,5 для решетки 1200 штр/мм или 2 для решетки 300 штр/мм.

На основании монохроматора расположен пульт управления. Тумблеры служат для следующих целей: 9 — включение сети; 10 — включение механизма развертки спектра; 12 — тумблер прямого или обратного хода развертки; 11 — переключатель скоростей развертки. Он имеет пять положений. Положения 1—4 соответствуют различным скоростям развертки спектра, в положении 5 редуктор отключается, а дифракционная решетка поворачивается от руки с помощью рукоятки 13. Скорости, соответствующие положениям 1, 2 и 3 переключателя, используются для регистрации спектров. Скорость 4 предназначена для быстрого поворота дифракционной решетки при выборе рабочего диапазона или при возвращении решетки в исходное положение.

Порядок работы

Подключить монохроматор к сети.

Включить тумблер сети, при этом должна загореться сигнальная лампа.

Установить необходимую скорость и направление развертки спектра.

Открыть затвор рукояткой.

Включить тумблер механизма развертки спектра, при этом загорится сигнальная лампа и начнется сканирование спектра.

Прибор выключается в обратном порядке.

Инфракрасный монохроматор ИКМ. В основу ИКМ положена оптическая схема Литтрова с автоколлимационным ходом лучей (рис. 39). Излучение, прошедшее через входную щель 4, падает на параболическое зеркало 1 и, отразившись от него, проходит сквозь диспергирующую призму 2. Разложенный пучок попадает на зеркало Литтрова 3, отражается от него, а затем, проходя через призму 2 вторично в обратном направлении, фокусируется зеркалом 1 и направляется зеркалом 5 на выходную щель 6. Спектр сканируется поворотом зеркала Литтрова. Преимущество схемы Литтрова заключается в том, что благодаря двойному прохождению лучей через призму дисперсия увеличивается вдвое, при этом повышается разрешающая способность монохроматора. Использование одного и того же зеркала 1 и для коллимации лучей, падающих на призму, и для фокусировки пучка делает схему компактной.

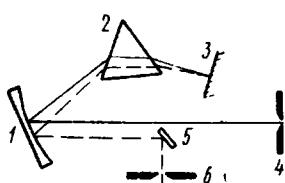


Рис. 39. Оптическая схема ИКМ

ся вдвое, при этом повышается разрешающая способность монохроматора. Использование одного и того же зеркала 1 и для коллимации лучей, падающих на призму, и для фокусировки выходящего пучка делает схему компактной.

Спектрометры

Оптическая схема спектрометра включает в себя источник излучения, монохроматор и приемник излучения с регистрирующим устройством. Приемник преобразует световой сигнал в электрический, который регистрируется стрелочным или цифровым прибором или записывается на диаграммной бумаге электронного потенциометра. Таким образом, сканируя спектр исследуемого излучения, спектрометр позволяет определить распределение световой энергии по длинам волн. С помощью спектрометра можно изучать спектры пропускания или отражения исследуемого вещества. Для этого нужно записать два спектра: кривую распределения по спектру энергии излучения источника и такую же кривую с установленным на пути светового пучка исследуемым образцом. Сравнение спектров позволяет выделить спектр поглощения (или отражения).

Спектрометр ИКС-12 предназначен для получения и регистрации инфракрасных спектров в области 0,75—25 мкм.

Основным элементом ИКС-12 является монохроматор ИКМ, т. е. оптическая схема Литтрова с автоколлимационным ходом лучей. Источником излучения служит силикатный стержень — глобар — с яркостной температурой 1300—1400° С, находящийся внутри кожуха водяного охлаждения. Излучение от источника проходит исследуемый образец и попадает в монохроматор, где разлагается в спектр, а затем поступает

на приемник — вакуумный термоэлемент. В результате теплового действия инфракрасных лучей на спае термоэлемента возникает э. д. с., которая после усиления регистрируется электронным потенциометром.

Оптическая схема ИКС-12 показана на рис. 40, а. Инфракрасное излучение от источника 1 проектируется зеркалами 3 и 4 через исследуемый образец 6 на входную щель 8. Пройдя

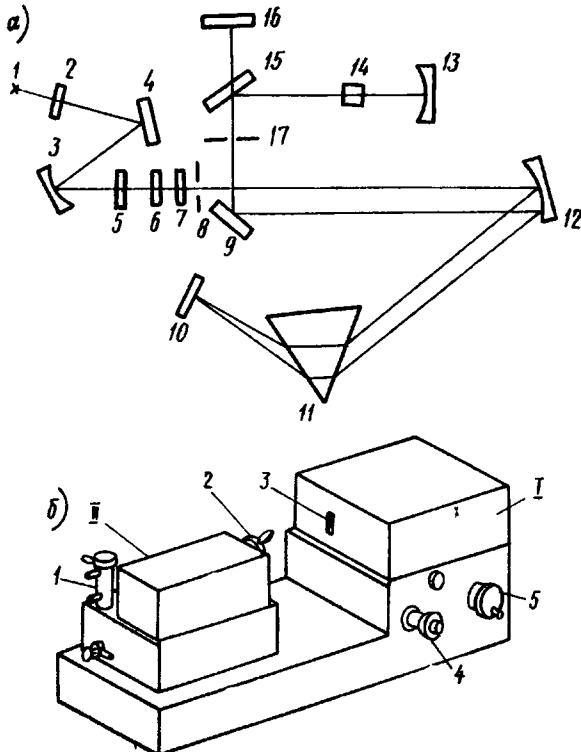


Рис. 40. Спектрометр ИКС-12 а — оптическая схема; б — внешний вид

входную щель, лучи попадают на параболическое зеркало 12 и, отразившись от него, разлагаются в спектр призмой 11. Затем лучи попадают на зеркало Литтрова 10, отразившись от которого вторично, разлагаются призмой 11 и фокусируются зеркалом 12 в плоскости выходной щели 17. Поворачивая зеркало 10, можно получить на выходной щели лучи различных длин волн.

Расположенные за выходной щелью зеркала — плоское 15 и сферическое 13 — проектируют выделенный спектральный участок с общим увеличением 0,35^х на термоэлемент 14. Вхо-

дное 2 и выходное 5 защитные окна осветителя, а также входные 7 и выходные 16 защитные пластины монохроматора защищают прибор от попадания пыли. Спектральный диапазон монохроматора 0,75—25 мкм перекрывается четырьмя сменными призмами из стекла Ф1, фтористого лития LiF, каменной соли NaCl и бромистого калия KBr. Монохроматор и осветитель прибора герметичны, для устранения атмосферного поглощения их заполняют сухим воздухом или азотом. Исследуемый образец 6 устанавливают перед входным окном монохроматора.

Требуемую длину волны устанавливают на выходной щели 17 поворотом зеркала 10 с помощью барабана длин волн. Барабан может поворачиваться вручную или автоматически от электродвигателя через редуктор. Спектр может быть записан при различных скоростях вращения электродвигателя. Запись ведется с помощью электронного потенциометра ЭПП-09.

Общий вид монохроматора 1 с осветителем 2 показан на рис. 40, б. Здесь 1 — глобар в кожухе водяного охлаждения; 2 — защитное окно; 3 — входная щель монохроматора; 4 — микрометрический винт раскрытия щелей. Ширина щелей устанавливается одновременно по шкале микрометрического винта от 0 до 2 мм с точностью до 0,001 мм (цена деления прямой шкалы 1 мм, круговой 0,001 мм).

Барабан длин волн 5 имеет нониусную шкалу. Во время записи спектра одновременно на бумагу могут быть нанесены реперные точки через 5, 10 или 20 малых делений барабана длин волн. Значения длины волны, соответствующие каждому делению барабана, устанавливаются предварительной градуировкой прибора по известному спектру.

Порядок работы

Включить агрегат электропитания в сеть и поставить выключатель «сеть» в положение «включено».

Пустить воду через кожух глобара.

Включить тумблер «глобар».

Включить электронный потенциометр, установить стрелку записывающего устройства на нулевое деление (щель должна быть закрыта).

Установить барабан длин волн в положение, соответствующее исследуемой длине волны. Если измерения предполагается производить в некотором диапазоне длин волн, устанавливается λ , соответствующая началу диапазона.

Откинуть зеркальную заслонку осветителя и установить ширину щели так, чтобы отклонение стрелки записывающего устройства было достаточным для измерения.

Установить необходимую скорость записи спектра.

Включить механизм развертки спектра.

Прибор выключается в обратном порядке.

ИСП-51 с приставкой ФЭП-1. В качестве спектрометра можно использовать спектрограф с фотоэлектрической приставкой. Например, для спектрографа ИСП-51 выпускается промышленностью приставка ФЭП-1. Она содержит объектив, заменяющий камерный, и дополнительную линзу 2, компенсирующую хроматизм системы. Эта линза перемещается во время сканирования спектра так, что изображение входной щели всегда лежит в плоскости выходной щели. Рабочий диапазон приставки 0,38—0,66 мкм. Приемником служит ФЭУ-17 с сурьмяно-це-зиевым катодом.

Напряжение, снимаемое с выходного сопротивления усилителя, усиливающего сигнал с ФЭУ, сравнивается с постоянным по величине опорным напряжением. Разность этих напряжений подается на вход самопищущего потенциометра ПС1-02. Чувствительность системы достаточна для регистрации энергии световых потоков до 10^{-13} Вт при воспроизводимости записи в пределах 5%.

Приставка содержит также специальное выдвижное зеркало и окуляр, с помощью которых можно проводить визуальное наблюдение спектра и юстировку прибора.

Приставка устанавливается на рельс спектрографа ИСП-51 и закрепляется. Для согласования оптической оси выходного коллиматора с оптической осью спектрографа тубус коллиматора, где размещены линзы объектива, разворачивается и перемещается вверх и вниз.

Внешний вид приставки ФЭП-1 показан на рис. 41. Тубус коллиматора 7 вращается и перемещается с помощью бородка, вставляемого в одно из специальных отверстий при снятой крышке. Выходная щель 10 имеет пределы раскрытия от 0 до 0,4 мм; точность отсчета 0,001 мм; отсчет ведется по барабанчику 13. Микроскоп 12 расположен в приемной голововке за выходной щелью. Свет направляется в него поворотным зеркалом, которое включается при вытягивании рукоятки 14 на себя до упора. Резкость изображения щели в поле зрения микроскопа достигается вращением накатан-

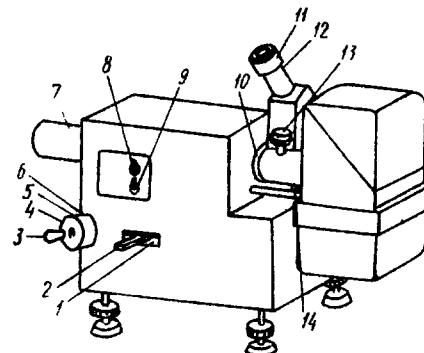


Рис. 41. Внешний вид приставки ФЭП-1

ногого кольца 11. На время записи спектра окуляр закрывается крышкой.

Включается электродвигатель поворота призм переключателем 8. Скорость поворота призм изменяется перестановкой рукоятки 2 по шкале 1. При установке рукоятки на деление 1, 2 и 3 призмы поворачиваются электродвигателем (автоматически), а в промежуточные положения — от руки с помощью рукоятки 3 барабана 4. Шкалы 5 и 6 введены для удобства наблюдения за углом поворота призм. Их показания соответствуют показаниям шкал барабана поворотного механизма спектрографа. Переключатель 9 позволяет изменять направление движения призменной системы.

Порядок работы

Поставить все выключатели в положение «выключено».

Включить в сеть записывающее устройство.

Включить низковольтный и высоковольтный стабилизаторы и выключатель самопищущего потенциометра.

Поставить рукоятку «усиление» в требуемое положение.

Установить на рельс используемый при работе источник света и осветить входную щель спектрографа.

Установить необходимую для записи ширину входной и выходной щелей.

Наблюдая в окуляр, вывести на выходную щель участок спектра, не имеющий линий (фона) в записываемой области, а затем выключить окуляр.

Рукояткой «установка нуля» установить перо самописца примерно на деление 20.

Установить барабан длин волн в положение, соответствующее началу записи.

Установить требуемые скорости движения призм и диаграммной ленты.

Установить нужное направление записи спектра.

Включить электродвигатели поворота призм и диаграммной ленты.

Включить лентопротяжный механизм потенциометра (самописца).

Записать спектр.

Выключение производится в обратном порядке.

Спектрофотометры

Спектрофотометром называется спектрометр с двухканальной оптической системой. В одном канале находится исследуемый образец, а другой является каналом сравнения. Поэтому спектрофотометр позволяет автоматически измерять

поглощение и отражение электромагнитной энергии исследуемым веществом.

Спектрофотометр ИКС-24 предназначен для измерения поглощения и отражения веществ в инфракрасной области спектра — от 2,5 до 25 мкм. Предусмотрена работа как по однолучевой, так и по двухлучевой схеме.

Основным элементом ИКС-24 является монохроматор, построенный по автоколлимационной схеме Литтрова. Источником излучения служит глобар с яркостной температурой 1300—1400° С, находящийся внутри кожуха водяного охлаждения. Приемник излучения — висмутовый болометр с пороговой чувствительностью $2 \cdot 10^{-10}$ Вт.

Действие ИКС-24 при работе по двухлучевой схеме основано на нулевом методе. Излучение от источника направляется по двум путям: на пути одного луча помещается исследуемый образец, на пути другого — фотометрический клин и образец сравнения. Фотометрический клин представляет собой клиновидную диафрагму, используется он для плавного ослабления интенсивности проходящего через него света. (Часто в качестве фотометрического клина используют пластинку с изменяющейся по длине прозрачностью). С помощью прерывателя оба луча попеременно проходят через монохроматор и разлагаются в спектр, после чего поступают на приемник излучения. При одинаковой интенсивности лучей исследуемого и сравнения на болометр поступает постоянное тепловое излучение; при этом сигнала на выходе болометра, т. е. и на входе усилительной системы, не возникает. Если интенсивности сравниваемых лучей различны, на входе усилителя появляется переменный сигнал, частота которого равна частоте смены лучей. Этот сигнал после усиления и преобразования подается на обмотку электродвигателя отработки, который перемещает фотометрический клин, уменьшая до нуля возникшую разность интенсивностей лучей. Фотометрический клин механически связан с пером регистрирующего устройства; перемещение пера пропорционально перемещению фотометрического клина и характеризует пропускание исследуемого вещества (в процентах).

Оптическая схема ИКС-24 показана на рис. 42, б. Излучение от источника 1 проектируется сферическими зеркалами 2 и 3 в плоскости фотометрического клина 25 и компенсирующего клина 4, установленного на пути луча, проходящего через образец. Компенсирующий клин служит для выравнивания интенсивности лучей в обоих каналах при отсутствии поглощающего объекта. Образцы исследуемый и сравнения устанавливаются непосредственно перед клиньями. После фотометрического клина луч сравнения направляется плоскими зеркалами 24 и 22 через вырез зеркального сектора моду-

лятора 21 на зеркала: торическое 6 и плоское 8, которые проектируют изображение части фотометрического клина, ограниченное диафрагмой, на входную щель 16 монохроматора. Луч образца после компенсирующего клина направляется плоским зеркалом 5 на зеркальную поверхность модулятора, а затем торическим зеркалом 6 и плоским 8 — на входную

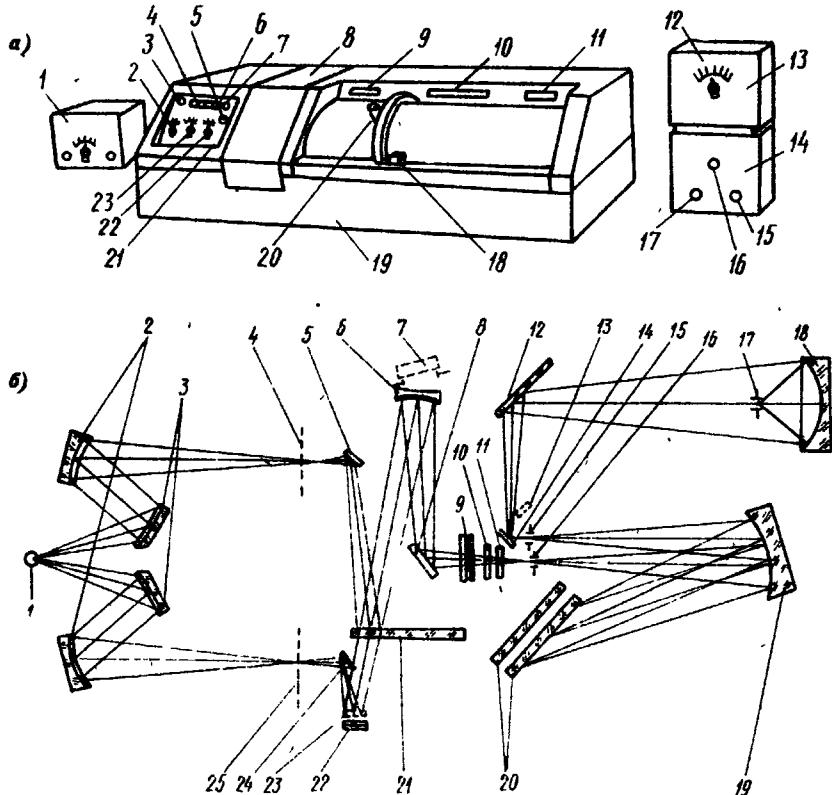


Рис. 42. Спектрофотометр ИКС-24: а — внешний вид;
б — оптическая схема

щель монохроматора. В монохроматоре, пройдя входную щель, совмещенную с фокальной поверхностью параболического зеркального объектива 19, параллельный пучок лучей падает на дифракционную решетку 20 и после дифракции на ней возвращается на зеркальный объектив 19, образующий монохроматическое изображение входной щели 15. Пройдя выходную щель, пучок направляется поворотными плоскими зеркалами 12 и 14 на эллиптическое зеркало 18, которое образует изображение

выходной щелн на светочувствительной площадке болометра 17. Для выделения первого порядка спектра после дифракции с помощью решетки на пути пучка ставится фильтр 9.

Щели монохроматора симметричные, раскрываются одновременно в пределах от 0,02 до 4 мм.

Зеркала 23, 7 и 13 служат для работы по однолучевой схеме. При работе с поляризующими образцами в схему включается поляризатор 10 или 11 в зависимости от рабочей области спектра.

Внешний вид ИКС-24 показан на рис. 42, а. Монохроматор с приемной частью спектрофотометра и проектирующей системой, осветитель и регистрирующее устройство с пером расположены на едином основании 19. Блоки входного усилителя 13, выходного усилителя 14 и питания 1 соединяются со спектрофотометром с помощью кабелей. Образец помещается в кюветное отделение 8. На пульте управления находятся органы управления и контроля. Рукоятка 7 позволяет выбрать положение компенсирующего клина, соответствующее необходимой ширине прорези в нем. Переключатель 2 позволяет выбрать необходимое раскрытие входной и выходной щелей: в его положении *Автоматическое раскрытие щелей* осуществляется по заданной программе, в положении *ручное* — вручную с помощью рукоятки 3 потенциометра. Для установки нужного масштаба записи по шкале волновых чисел ν (в спектроскопии принято $\nu = 1/\lambda$) служит переключатель 23. Скорость сканирования спектра выбирается с помощью переключателя 22, а переключатель 5 позволяет установить ускоренный ход сканирования и включить модулятор. Кнопки 4 служат для установления необходимой постоянной времени усилителя. Кнопка 21 — включение спектрофотометра. Рукоятка 7 позволяет корректировать положение на бланке линии 100%-ного пропускания. На пульте помещена также лампа 6, сигнализирующая отсутствие воды в охлаждающем глобар кожухе.

Над диаграммной лентой имеются табло 10 сигнализации включения фильтров и решеток, счетчик 9 ширины раскрытия щелей и счетчик 11 волновых чисел. Перо 20 записывающего устройства совмещается со шкалой бланка нажатием кнопки 18 в положении 4 переключателя 23.

На блоках усилителей размещены потенциометры регулировки коэффициента усиления 17 и установки баланса схемы усилителя 15; потенциометр установки разбаланса моста входного усилителя 12, а также световой индикатор 16 для контроля величины разбаланса.

Подготовка к работе

Проверить наличие колпачка на болометре.

Включить воду.

Включить на блоке питания тумблеры включения спектрофотометра и усилителей.

Установить напряжение питания глобара 36 В. Проверить, не горит ли лампа на пульте спектрофотометра, сигнализирующая о малом напоре воды или ее отсутствии.

Поднять крышки кюветного отделения и монохроматора, проверить на глаз качество изображения источника излучения на входных диафрагмах, установленных близко к плоскости фотометрического и компенсирующего клиньев. Изображение должно быть достаточно резким, искривленным и симметрично расположенным относительно горизонтальной оси вырезов диафрагм.

Снять колпачок с болометра и закрыть крышки монохроматора и кюветного отделения.

Порядок работы по двухлучевой схеме

1. Закрыть окна осветителя шторками.

2. Установить рукояткой потенциометра входного усилителя величину разбаланса, соответствующую углу светового сектора примерно 15—20° (соответствует хорде 5—8 мм) на экране индикатора выходного усилителя.

3. Поместить бланк на столе регистрирующего устройства по рискам; совместить вертикальную и горизонтальные риски с рисками записывающего устройства и закрепить бланк валиками.

4. Установить на счетчике требуемое волновое число в любой выбранной точке диапазона; для этого перевести переключатель в положение «ускоренный ход прямой» или «ускоренный ход обратный» и нажать кнопку пуска спектрофотометра; остановку производить той же кнопкой.

ВНИМАНИЕ! Во избежание удара каретки с пером о корпус записывающего устройства нельзя работать с ускоренным ходом (прямым или обратным), а также со скоростью сканирования 6 в сочетании с масштабом 4!

5. Совместить перо регистрирующего устройства с волновым числом на бланке, соответствующим волновому числу на счетчике, при нажатой кнопке каретки записывающего устройства.

6. Установить переключатель в положение «модулятор» и включить кнопку пуска спектрофотометра.

7. Установить щель на требуемую программу или на требуемую величину раскрытия. Программа щелей выбирается в зависимости от нужного спектрального интервала.

8. Открыть окна осветителя и монохроматора.

9. Установить потенциометр коэффициента усиления (на блоке выходного усилителя) на одно— полтора деления шкалы (при этом перо должно находиться у линии 100 %-ного пропускания) и подобрать такое усиление, при котором после кратковременного перекрытия пучка образца рукой перо, отклоненное на 20—40% от линии 100 %-ного пропускания, возвратится в прежнее положение достаточно быстро и без периодических колебаний. Подбирать усиление следует на таком участке спектра, где нет интенсивных полос поглощения атмосферной воды и углекислого газа.

10. Перекрыть оба пучка заслонками так, чтобы перо остановилось в середине шкалы. Если перо перемещается в одну сторону, вращением рукоятки потенциометра «баланс» на блоке выходного усилителя добиться, чтобы оно едва заметно колебалось относительно какого-то среднего положения. Эти колебания вызываются шумами болометра.

11. Откинуть заслонки обоих окон. Если перо не останавливается на делении 100 по бланку, отрегулировать его положение рукояткой корректировки на панели управления.

12. Закрепить исследуемый образец и образец сравнения в держателях и установить держатели в направляющие на окнах спектрофотометра.

13. Установить требуемую скорость развертки спектра и масштаб записи.

14. Установить переключатель в положение «запись», включить кнопку включения спектрофотометра и произвести запись спектра.

15. По окончании записи перекрыть заслонками оба пучка.

16. Выключить прибор соответствующей кнопкой.

17. По окончании работы выключить прибор в следующем порядке: отключить глобар; выключить усилитель; выключить сеть; закрыть воду.

ГОНИОМЕТР-СПЕКТРОМЕТР ГС-5

Гониометр-спектрометр предназначен для измерения углов между плоскими полированными гранями твердых прозрачных и непрозрачных предметов, для определения показателя преломления прозрачных твердых материалов по измеренному углу наименьшего отклонения призмы, для измерения дисперсии по углу наименьшего отклонения призмы и других исследовательских работ.

Оптическая система. Оптическая система гониометра состоит из коллиматора, зрительной трубы и отсчетного устройства (рис. 43, а, б). Коллиматор дает параллельный пучок

лучей. В него входят лампа 1, сетка 2 и объектив 3. Зрительная труба состоит из объектива 4, сетки 5 и окуляра 6. Отсчетное устройство содержит матовое стекло, конденсор, светофильтр, призмы, стеклянный лимб, подвижные и неподвижные клинья, разделительный блок, шкалу и окуляр.

В отсчетном устройстве свет от лампы через матовое стекло 7, конденсор 8, светофильтр 9 и прямоугольную призму 10 попадает на лимб 11 со шкалой. Цена деления шкалы $20'$, всего 1080 делений. Оцифровка делений произведена через 1° . С помощью призменных блоков 10 изображение штрихов передается на диаметрально противоположный участок лимба.

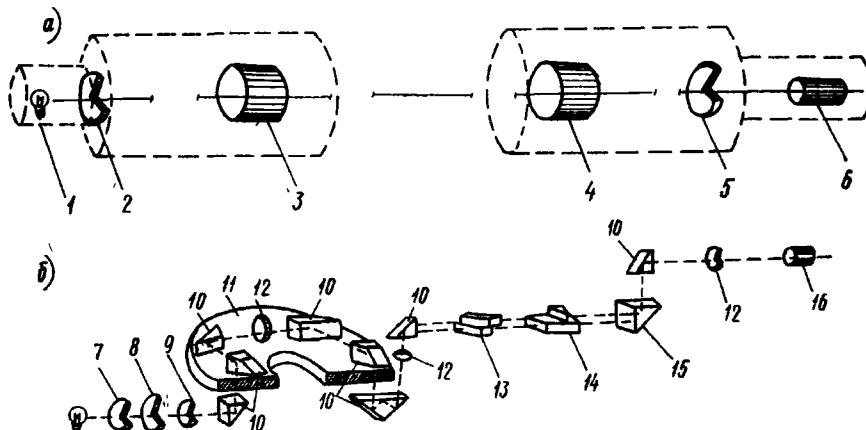


Рис. 43. Оптическая схема гониометра ГС-5: а — коллиматор и зрительная труба; б — отсчетное устройство гониометра

Изображения двух диаметрально расположенных участков лимба через систему призм 10 передаются в оптический микрометр и разделительный блок, причем одно изображение прямое, другое — обратное.

Принцип действия оптического микрометра заключается в следующем. По ходу лучей от лимба 11 к разделительному блоку помещены две пары оптических клиньев 13 и 14. Верхние и нижние клинья каждой пары имеют одинаковые, но направленные в противоположные стороны углы и представляют в сумме плоскопараллельные пластиинки. Верхние клинья расположены на путях пучка лучей, дающих прямое изображение, нижние — обратное (от диаметрально расположенного участка лимба). При движении подвижных клиньев 14 по ходу лучей будет происходить сближение прямого и обратного изображения, против — их расхождение. Каждое последующее совмещение штрихов обоих изображений делений лимба будет происходить при повороте лимба

на $10'$, хотя он разделен на 20-минутные интервалы, что объясняется движением обоих изображений в противоположные стороны с одинаковой скоростью. Например, пусть лимб поворачивается на $10'$, тогда прямое изображение пройдет путь $10'$ и обратное также $10'$, что в сумме цифровых делений составит $20'$, хотя истинный поворот лимба был $10'$. Это приводит к тому, что цену деления лимба $20'$ при отсчете надо будет брать равной $10'$.

Шкала микроскопа 16 нанесена на стеклянную пластинку и механически связана с одним из клиньев. Предел перемещения клиньев $10'$. Это соответствует перемещению всей шкалы, имеющей 600 делений. Таким образом, цена одного деления шкалы микрометра равна $\frac{10'}{600} = 1''$. На рис. 43, б

12 — линзы объективов; 15 — разделительный блок.

Снятие показаний. Поле зрения отсчетного микроскопа приведено на рис. 44. В левом окне наблюдаются изображения диаметрально противоположных участков лимба и вертикальный индекс для отсчета градусов; в правом окне — деления шкалы оптического микрометра и горизонтальный индекс для отсчета минут и секунд.

Чтобы снять отсчет, необходимо повернуть маховичок оптического микрометра так, чтобы верхние и нижние изображения штрихов лимба в левом окне точно совместились.

Показания определяются следующим образом: Число градусов — левая цифра от вертикального индекса. Число десятков минут — число интервалов между верхним значением числа градусов и нижним значением, отличающимся от верхнего на 180° . Например, если число градусов было 0° , то ищем число интервалов между 0° и 180° . На приведенном рисунке он один, что соответствует $10'$. Число единиц минут — левый ряд чисел в правом окне. Число десятков секунд — правый ряд чисел в правом окне. Число секунд — число делений от цифры десятков секунд до горизонтального индекса.

Устройство. Общий вид гониометра ГС-5 приведен на рис. 45. Коллиматор крепится на неподвижной стойке. Фокусируется коллиматор маховичком 14 по шкале с делениями, цена деления 1 мм. Шкала определяет положение фокусирую-

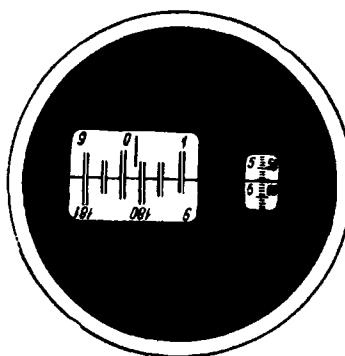


Рис. 44 Поле зрения отсчетного микроскопа (отсчет — $0^\circ 15' 56''$)

щей линзы. Винт 15 служит для юстировки визирных осей по вертикали. Ширина щели регулируется винтами 13.

Зрительная труба 1 со стойкой, в которой вмонтирован микроскоп, крепится к алидаде 11, фокусируется маховичком 14 по шкале.

Алидада вращается вокруг оси прибора и установленного на ней лимба от руки и точно микрометрическим винтом 2 при зажатии винта 3.

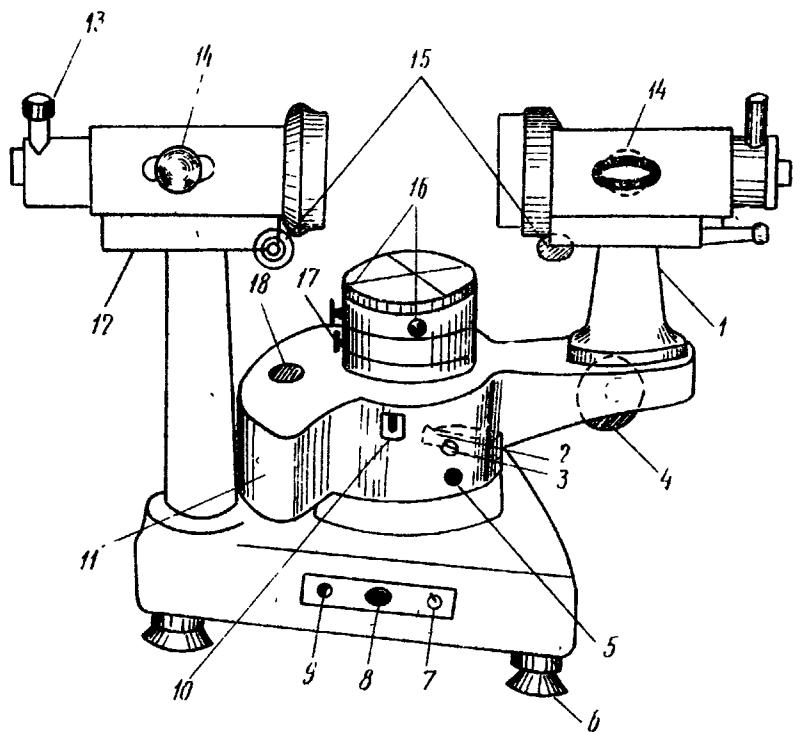


Рис. 45 Внешний вид гониометра ГС-5

Лимб может вращаться также вместе с алидадой. Раздельное или совместное вращение лимба и алидады регулируется рычажками 10. При неподвижной алидаде лимб имеет еще два варианта движений — самостоятельное, относительно алидады и столика, и вместе со столиком. Самостоятельное вращение лимба относительно столика и алидады производится маховичком 5. Вращение лимба вместе со столиком осуществляется грубо от руки и точно микрометрическим винтом 11.

Столик может вращаться: самостоятельно при неподвижном лимбе и алидаде; вместе с лимбом относительно алидады и зрительной трубы; вместе с лимбом и алидадой. Наклоняется столик с помощью винтов 16. На том же рисунке 4 — ма-ховичок оптического микрометра (сзади); 6 — подъемный винт; 7 — выключатель; 8 — розетка; 9 — переключатель; 12 — коллиматор; 17 — винт поворота столика; 18 — уровень.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Источники излучения	4
Источники теплового излучения	4
Источники люминесцентного излучения	6
Характеристики источников излучения	8
Осветитель люминесцентный ОИ-17 и ОИ18	11
Лазер	12
Оптические квантовые генераторы ГЛ-36 и ЛГ-75	19
Оптический квантовый генератор ЛГ-55	21
Приемники излучения	22
Приемники с внешним фотоэффектом	23
Приемники с внутренним фотоэффектом	25
Диспергирующие элементы	30
Призмы	30
Дифракционные решетки	33
Основные элементы, характеристики и типы спектральных приборов	37
Основные характеристики	38
Типы спектральных приборов	39
Гониометр-спектрометр ГС-5	55

Замеченные опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
40	6-я снизу	ходная щель 1	входная щель 2
40	2-я снизу	на шкале 2	на шкале 1
47	7-я снизу	отразившись от кото- рого вторично, разлага- ются	отразившись от кото- рого, вторично разлага- ются
49	8 сверху	дополнительную лин- зу 2, компенсирующую	дополнительную лин- зу, компенсирующую