

## ***ЛЕКЦИЯ №28***

### **Квантовые усилители и генераторы. Лазеры.**

#### **Индукцированное излучение**

До сих пор мы рассматривали лишь такое взаимодействие излучения с веществом, в результате которого происходит ослабление потока вследствие рассеяния и поглощения. Однако, возможны такие процессы, при которых поток излучения, проходя через вещество, будет не ослабляться, но усиливаться, на что впервые указал Фабрикант в 1939 г. Подобные процессы реализуются в приборах, получивших название квантовых усилителей и квантовых генераторов, рассматриваются они в недавно родившейся области науки - квантовой электронике.

В 1964 г. за достижения в этой области была присуждена Нобелевская премия Басову, Прохорову и Таунсу.

Квантовые генераторы, излучающие в диапазоне видимого и инфракрасного излучения, получили название лазеров (“light amplification by stimulated emission of radiation”) – усиление света индуцированным излучением; в генераторах, работающих в микроволновом диапазоне, буква “l” заменена на “m” мазер (“microwave”...).

В 1915 году Эйнштейном впервые были введены понятия о спонтанном (самопроизвольном) и индуцированном (вынужденном) излучениях. Самопроизвольные переходы электронов могут осуществляться только в одном направлении - с более высоких уровней на более низкие. Вынужденные переходы могут происходить как в одном, так и в другом направлении. В случае перехода на более высокий уровень атом поглощает падающее на него излучение. При вынужденном переходе с одного из возбужденных (высоких) уровня на более низкий происходит излучение атомом фотона, дополнительного к тому фотону, под действием которого произошел переход. Это дополнительное излучение называется вынужденным (или индуцированным).

Вынужденное излучение обладает весьма важными свойствами. Направление его распространения в точности совпадает с направлением распространения внешнего излучения, вызвавшего переход. То же самое относится к частоте, фазе и поляризации вынужденного и внешнего излучений. Вынужденное излучение строго когерентно с вынуждающим.

## Состояние инверсной заселенности

Для получения индуцированного или стимулированного излучения необходимо создать особое состояние излучающего вещества, называемое **инверсным** (или **обращенным**).

В случае термодинамического равновесия распределение атомов по различным энергетическим состояниям определяется распределением Больцмана:

$$N_i = C \cdot e^{-\frac{E_i}{kT}}, \quad (28.1)$$

где  $N_i$  - число атомов, находящихся при температуре  $T$  в состоянии с энергией  $E_i$  (полагаем для простоты, что все уровни не являются вырожденными).

Из этой формулы следует, что с увеличением энергии состояния населенность уровня, т.е. количество атомов в данном состоянии, уменьшается. Число переходов между двумя уровнями пропорционально населенности исходного уровня, уровня, с которого переводятся атомы. Следовательно, в обычной системе атомов, находящейся в термодинамическом равновесии, поглощение света падающей волны будет преобладать над вынужденным излучением (преобладающим, более вероятным процессом, будет перевод атомов на более высокие уровни). Падающая световая волна при этом будет ослабляться, т.к. вызванное излучение будет распространяться во все стороны и рассеиваться.

Для того, чтобы вызвать усиление падающей волны, нужно каким-либо образом обратить населенность энергетических уровней, т.е. сделать так, чтобы в состоянии с бóльшей энергией  $E_n$  находилось бóльшее число атомов, чем в состоянии с мéньшей энергией  $E_m$ . В этом случае говорят, что данная совокупность атомов **характеризуется инверсной населенностью**.

В соответствии с формулой (28.1)

$$\frac{N_n}{N_m} = e^{-\frac{(E_n - E_m)}{kT}}. \quad (28.2)$$

В случае инверсной заселенности энергетических уровней  $N_n/N_m > 1$  при  $(E_n - E_m) > 0$ , т.е. при  $E_n > E_m$ . Такое состояние было бы устойчивым, если бы была возможна отрицательная температура в абсолютной шкале Кельвина. Реально такое состояние является метастабильным. Иногда его называют состоянием с отрицательной абсолютной температурой ( $T < 0$ ).

В веществе с инверсией заселенности энергетических уровней вынужденное излучение может превысить поглощение света атомами, вследствие чего падающий пучок све-

та при прохождении через вещество будет усиливаться. Изменение интенсивности света при прохождении через поглощающую среду описывается формулой Бугера-Ламберта:

$$I = I_0 \cdot e^{-\lambda \ell}, \quad (28.3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент линейного поглощения вещества.

В случае усиления света следует полагать  $I > I_0$  и, следовательно, приходится считать величину  $\lambda < 0$ . Поэтому иногда совокупность атомов с инверсной населенностью называют состоянием с отрицательным коэффициентом поглощения.

### Методы осуществления инверсной заселенности

Вообще существует четыре способа осуществления инверсной заселенности. 3 из них мы рассмотрим.

Наиболее широко распространен метод «накачки».

#### **а) Метод оптической накачки. Рубиновый лазер**

Метод оптической накачки широко применяется в твердотельных лазерах, где рабочим телом служат кристаллы или специально изготовленное стекло.

Например, рубин, используемый для лазеров, представляет собой искусственно выращенный кристалл  $Al_2O_3$  с малой добавкой ионов  $Cr^{+3}$ , сообщающей бесцветной окиси алюминия легкую розовую окраску. Именно с применением такого кристалла был изготовлен в июле 1960 года Теодором Мейманом исторически первый твердотельный лазер (диаметр круглого стержня составлял 1 см, длина – 5 см) (рис.28.1).

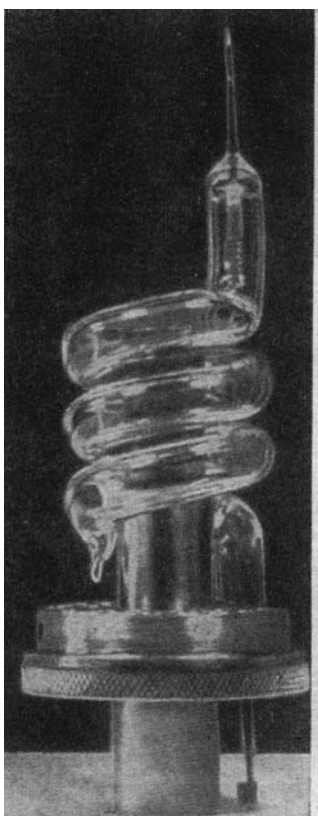


Рис.28.1. Рубиновый лазер, впервые созданный Мейманом.

Другие известные материалы – иттриево-алюминиевый гранат  $Y_3Al_5O_{12}$  (ИАГ), фторид кальция  $CaF_2$  с добавкой самария (Sm) и диспрозия (Dy). В последнее время самыми распространенными технологическими лазерами являются устройства, в которых в качестве рабочего тела используются стержни из ниобиевого стекла, причем стержни могут быть как круглого, так и прямоугольного сечения и достигают до 0,5 м длины и до 20 мм в диаметре или 10x30 мм в поперечном сечении. В полупроводниковых лазерах, широко применяемых в компьютерной и множительной технике, средствах цифрового преобразования сигнала

лов и т.п. часто применяется сплав арсенид галлия GaAs и многие его производные. Известны также жидкостные рабочие среды на красителях, позволяющие получить лазеры с перестраиваемой частотой и самые мощные на сегодняшний день газовые лазеры с мощностями до десятков киловатт (в открытых публикациях, по некоторым предположениям – до сотен кВт в лазерах специального назначения).

Идея создания инверсной заселенности с помощью оптической накачки заключается в следующем.

Рубиновый или другой твердотельный лазер принципиально представляет собой следующее устройство (рис.28.2):

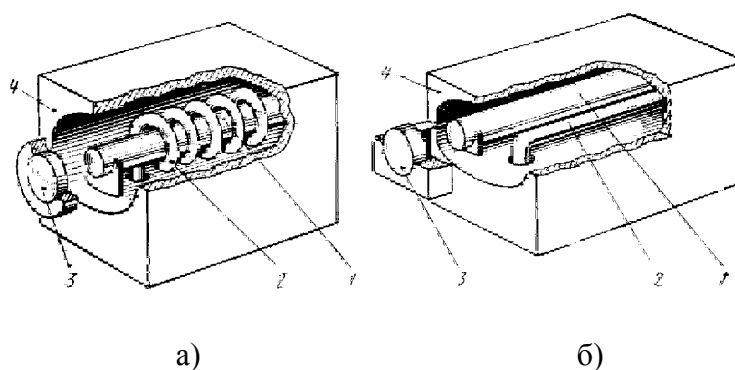


Рис. 28.2. Устройство лазера со спиральной (а) и с прямой лампой накачки: 1 - активный элемент, 2 - лампа накачки, 3 - зеркало резонатора, 4 - корпус осветителя.

Твердотельные лазеры работают в импульсном режиме с большими тепловыми потерями. Поэтому вся конструкция интенсивно охлаждается проточной водой или жидким азотом.

Рассмотрим упрощенную трехуровневую модель вещества, аналогичного рубину (рис.28.3)

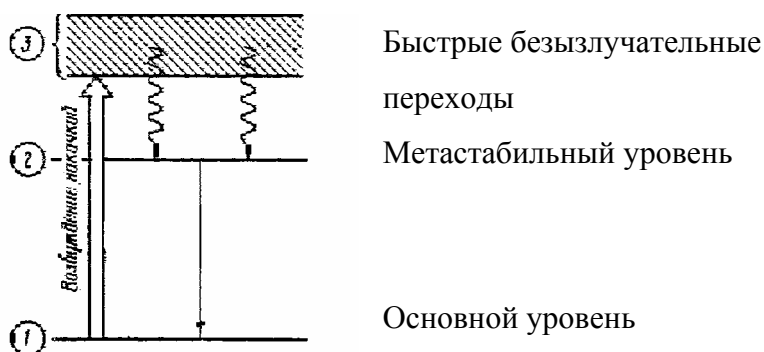


Рис.28.3. Упрощенная трехуровневая модель оптической накачки энергетических уровней твердотельного лазера.

С основного уровня квантами света атомы вещества, как правило примеси (в рубине – ионы хрома) из основного состояния 1 переводятся в возбужденное состояние 3, время жизни в котором составляет всего  $\sim 10^{-8}$  с. Метастабильный уровень 2 инвертируется - число атомов на этом уровне больше, чем на более низком (I). Время жизни атома на этом уровне ( в метастабильном состоянии)  $\sim 10^{-3}$  ( против  $10^{-8}$  сек в возбужденную состоянии на уровне 3 ). При возникновении переходов 2-1 излучаемые фотоны вызывают индуцированное излучение, связанное с мгновенным резонансным “сваливанием” с уровня 2 па уровень I. Однако, одновременно возможны и спонтанные переходы 2-1, поэтому для поддержания инверсной заселенности необходимо создавать подкачку энергии, компенсирующую спонтанное рассеяние энергии.

Если вспомнить теперь, что индуцированное излучение совпадает с возмущающим как по частоте, так и по направлению, то становится ясно, что развитие индуцированного пучка происходит подобно лавине нарастающей мощности (рис. 28.4)

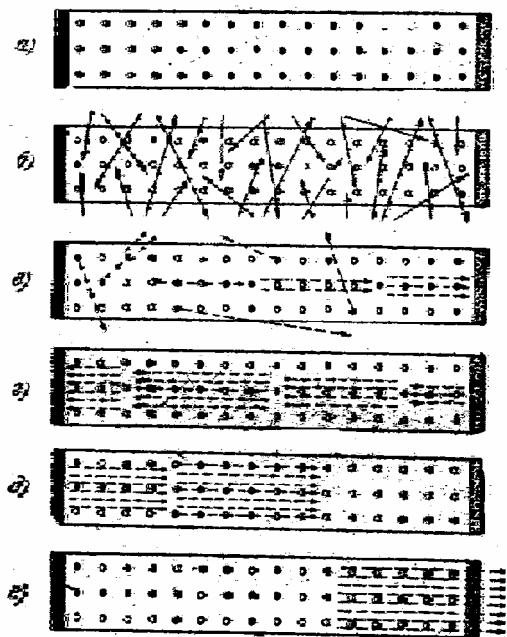


Рис. 28.4. Формирование лазерного пучка.

Спонтанный переход 2-1 вызывает излучение соответствующего фотона. Этот фотон может вызвать вынужденное испускание дополнительных фотонов, формируется каскад фотонов, распространяющихся в том же направлении, что и иницирующий фотон. Фотоны, направления движения которых образуют малые углы с осью стержня, испытывают многократные отражения от торцов образца, снабженных полностью и частично отражающими зеркалами. Фотоны, испущенные в других направлениях (а их – большинство) выходят «бесплатно» через боковые поверхности – это потери..

На рис. 28.4 (а) ионы хрома в основном энергетическом состоянии изображены черными кружками. Свет подкачки (сплошные стрелки на рис. 28.4,б) переводит большинство ионов в возбужденное состояние 3 (рис.28.3). Каскад начинает развиваться, когда возбужденные атомы излучают фотоны (пунктирные стрелки на рис. 28.4,в) в направлении, параллельном оси кристалла. Фотоны размножаются за счет вынужденного излучения в ходе движения пучка вдоль оси при отражении от торцов (рис. 28.4, г,д). Когда пучок становится достаточно интенсивным, часть его выходит через полупрозрачное зеркало правого торца (рис. 28.4, е).

Таким образом, если непрерывно подкачивать энергию, достаточную для компенсации спонтанного излучения (в стороны и  $\Rightarrow$  в тепло), то лазер будет работать в режиме непрерывной генерации на некоторой постоянной длине волны. Подкачка осуществляется светом с длиной волны меньше излучаемой.

### **Гигантские импульсы**

У лазеров непрерывного действия мала мощность, у лазеров импульсного действия ( время свечения  $\sim 10^{-3}$  сек), мощность - до десятков квт. Наибольшая мощность - у лазеров, работающих в режиме гигантских импульсов (длительность свечения –  $10^{-8}$  -  $2 \cdot 10^{-9}$  сек) полная энергия - до 20 Дж, мощность  $\sim 2 \cdot 10^9$  Вт, больше любой электростанции мира.

**Идея** - необходимо до предела инвертировать рабочее тело, затем «выстрелить» всеми атомами. **Трудность** - если зеркала все время отражают фотоны, то начинается генерация, «сваливающая» атомы и не позволяющая создать предельную инверсную населенность.

**Осуществление** – полностью отражающее зеркало включается в момент, когда накачка осуществлена.

**Решение** проблемы достигается несколькими способами:

- 1) зеркало размещается на одной грани вращающейся около торца кристалла призмы;
- 2) между зеркалом и торцом кристалла устанавливается жидкостная ячейка Керра, мгновенно пропускающая поляризованные фотоны к зеркалу после электрической «команды» извне;
- 3) устанавливается ячейка Поккельса (из анизотропного кристалла), идея управления – как и с ячейкой Керра;
- 4) используется эффект Фарадея (пропускание пучка в столбе жидкости в мощном магнитном поле).

### **Инверсия населенностей в газах с помощью электрического разряда.**

#### **Гелий-неоновый лазер.**

Газовые лазеры могут быть созданы на основе различных рабочих тел – газов:  $\text{CO}_2$  для самых мощных промышленных и боевых лазеров, азота, аргона, смеси He и Ne для медицинских и «прицелочных» лазеров, на парах металлов и др.

Основой устройства гелий-неонового лазера, предложенного в 1961 году А. Джаваном, является разрядная трубка, заполненная смесью He под давлением 1 мм рт. ст. и неона под давлением 0,1...0,2 мм рт. ст. На концах трубки имеются зеркала, одно из которых полупрозрачно (рис.28.5).

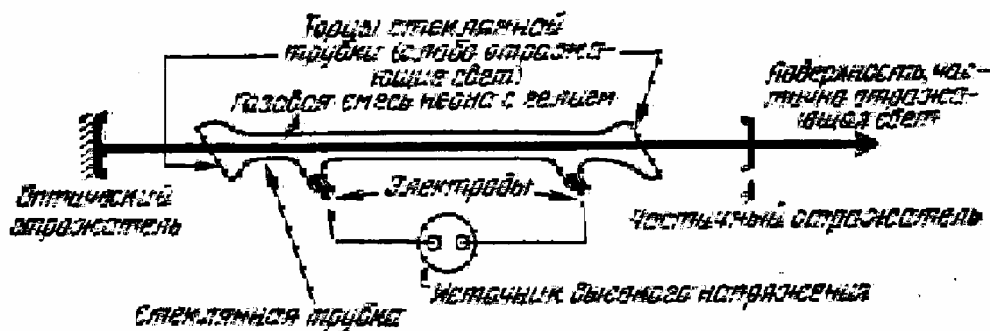


Рис.28.5. Принципиальная схема газового отпаянного лазера. В мощных лазерах рабочий газ или смесь газов прокачивается в трубной конструкции, часто - многоэлементной.

Если к концам трубки приложить электрическое напряжение достаточной величины (около 2 кВ), в газе возникнет электрический разряд – электроны, вырванные из молекул рабочего газа будут ускоряться электрическим полем. Частично они будут расходоваться на ионизацию молекул и создание новых электронов, а частично – на возбуждение молекул газа за счет неупругих соударений с ними электронов. В случае гелий-неонового лазера инверсная населенность создается у молекул неона следующим образом (рис.28.6).

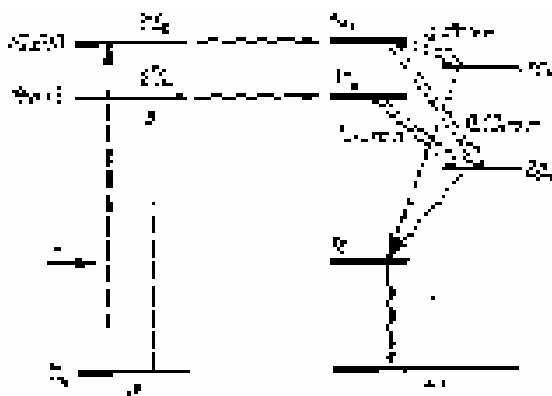


Рис. 28.6. Схема создания инверсной населенности неона в гелий-неоновом лазере.

У гелия (He) 2 уровня 2s. Эти уровни оптически возбуждаться не могут из-за очень большой энергии  $\sim 20$  эВ – возбуждение фотоном невозможно, невозможно и освобождение от полученной энергии возбуждения путем сброса фотона.

Возбужденным за счет соударений с электронами метастабильным состоянием 2s предоставляется возможность сбросить энергию атомам неона (Ne) при соударении. У неона имеются состояния 4s и 5s, очень близкие к 2s состояниям He. Из состояний 4s и 5s разрешены переходы (с излучением) в состояния 3p и из 3p в 3s и на более нижние уровни. На уровнях 4s время жизни  $\sim 10^{-6}$  сек, а на 3p  $\sim 10^{-8}$  сек, поэтому при достаточной подкачке энергии создается устойчивая стационарная инверсная населенность уровней Ne 4s, 5s относительно 3p. Ясно, что гелий-неоновый лазер дает так называемый многомодовый

режим излучения, излучение нескольких длин волн, различных по интенсивности. Переход  $5s - 3p$  дает излучение в видимой области с  $\lambda = 0,6$  мкм,  $4s-3p$  – инфракрасное с  $\lambda = 1,1$  мкм, есть еще  $3,4$  мкм и другие. Инфракрасные моды как правило поглощаются стеклянными стенками трубки.

Этот лазер в импульсном режиме работать не может, но для  $CO_2$  – лазеров импульсный режим реализуется.

### **Инверсия населенности в полупроводниках, Полупроводниковые лазеры.**

С точки зрения зонного строения полупроводников, переход электронов в зону проводимости и возникновение электронно-дырочных пар может быть вызвано «электромагнитным облучением», пропусканием электрического тока через p-n- переход. Рекомбинация сопровождается спонтанным излучением фотона.

Вынужденное (индуцированное) излучение будет преобладать только при таком распределении населенностей, когда электроны проводимости плотно заполняют область вблизи «дна» зоны проводимости, а дырки – вблизи «потолка» валентной зоны. Создание такого распределения – непростая задача, но она решается несколькими способами:

- 1) **Инжекция** извне электронов и дырок в полупроводник, как правило, примесного типа, причем электроны «впрыскиваются» в зону проводимости, а дырки – в валентную. Инверсная населенность возникает в зоне p-n- перехода, осуществление достигается путем соответствующего подбора режима пропускания электрического тока (рис.28.7).

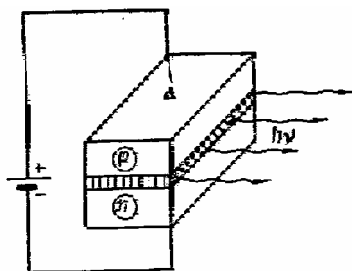


Рис. 28.7. Полупроводниковый лазер. Характерные размеры  $400 \times 400 \times 100$  мкм.

- 2) **Оптическая накачка полупроводников.**

Частота накачки должна быть больше частоты усиливаемого или генерируемого излучения, с мощностью, достаточной для компенсации релаксации p-n и создания необходимой концентрации электронов в зоне проводимости.



- 3) **Бомбардировка** полупроводника пучком электронов с энергий в несколько тысяч электронвольт. Достоинство – высокий КПД, легкость управления интенсивностью излучения, компактность.

$$\lambda_{\text{пп-лазера}} = f(T).$$

#### Свойства лазерного излучения.

1. Высокая монохроматичность в пределах одной моды ( $\Delta\lambda \approx 0,1\text{\AA}$ ).
2. Когерентность лазерного излучения, как пространственная, так и временная.  $\lambda = \text{const}$  из-за строгого постоянства энергетического перехода атомов-излучателей. Пространственная когерентность наблюдается благодаря малой «расходимости» пучка ( $\sim$  нескольких угловых секунд). Если квант движется не параллельно оси, то он выходит за боковую поверхность рабочего тела.
3. Высокая концентрация энергии в пучке (в принципе до сотен кВт, хотя при этом воздух «горит»).
4. Высокая концентрация электромагнитного поля ( $E \sim 10^9$  В/см!).

#### Применение лазеров.

1. Медицина – приварка сетчатки глаза, коррекция зрения, диагностика внутренних органов с помощью волоконной оптики, хирургический инструмент «Ятаган».
2. Нелинейная оптика. Изучение поведения материалов в условиях воздействия на них сверхсильных полей, соизмеримых с внутриатомными полями. Самофокусировка, строчки проплавления.
3. Плавление поверхности металлов; прошивка отверстий в материалах любой твердости методом испарения атомов (изготовление отверстий или лунок в серийных часовых камнях из сверхтвердого рубина, сверление в алмазах для создания фильер); скрайбирование (удаление участков в виде пятен и полосок), как способ подгонки резисторов, а также для уравнивания быстроходных гироскопов, турбинных валов и т.п.; локальная термическая обработка металлов и сплавов для повышения прочности и сопротивления истиранию; сварка и резка самых различных материалов, в электронной промышленности - заваривание мелких изделий, пальчиковых ламп, герметизация корпусов, отрезка и заварка стеклянных трубок.
4. Широкое применение в военном деле – локация и измерение скорости быстролетающей цели, целеуказание и самонаведение ракет и бомб. Американцы опре-

делили, что на уничтожение цели обычным образом им требовалось 1000 самолетовылетов, а с использованием бомб с лазерным наведением – только 20, экономия в 30 раз или в долларах – около 600 000\$. Для целеуказания и подсвечивания используется излучение невидимого человеческого глазом (но не специальными термодатчиками или болометрами!). Лазерные системы навигации и посадки обеспечивают безопасность полетов. В литературе 20-тилетней давности описывались работы по созданию систем дистанционного управления самолетом – вместо примитивных механических тяг – системы с проводной или световодной системой подачи управляющего сигнала к исполнительному механизму управления стабилизаторами, подкрылками, гидравликой и т.д. Без лазеров современные военные обходиться уже не могут.

5. Исследовательские цели. Осуществлена локация Луны с точностью до 0,5 м путем установки на «Луноходе» уголкового отражателя французского производства. Собрыв в одной точке импульсное излучение десятка лазеров, удается нагреть мишень-шарик в установке термоядерного синтеза до температур в миллионы градусов. В области связи один канал опτικο-волоконной связи при надежной модуляции способен заменить все каналы проводной телефонной связи между восточным и западным побережьем США.
6. На полупроводниковых лазерах строятся современные счетно-решающие устройства и устройства копировальной техники.
7. Лазерная техника позволила реализовать практически известную раньше теоретически голографию.

## Голография

Голография была изобретена английским физиком (венгром по национальности) Деннисом Габором в 1947 году. Однако идеи Габора нашли свое воплощение лишь в 1962 году, с появлением лазеров

Голография принципиально отличается от фотографии. На голограмме регистрируется не само изображение предмета, а фиксируется структура световой волны, отраженной предметом. Голография - поистине уникальный способ получения объемного изображения.

Для получения голограммы необходимо, чтобы на фотоэмульсию одновременно со светом, рассеянным объектом (предметный пучок), попадала, также и некоторая часть света источника, освещающего этот объект (опорный пучок) (рис. 28.8). При этом необхо-

димо, чтобы свет, рассеянный объектом, мог интерферировать с опорным пучком. Образующаяся интерференционная картина - чередование темных и светлых пятен, областей, после проявления фотопластинки дает **голограмму**.

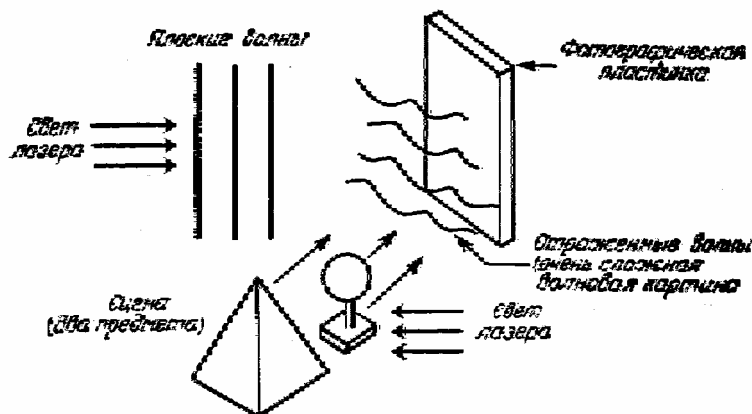


Рис. 28.8. Схема получения голограммы.

На голограмме отсутствуют элементы, хоть сколько-нибудь напоминающие оригинал. (При обычном освещении невооруженный глаз вообще не может отличить голограмму от испорченного фотонегатива при многоточечном строении объекта). Однако, вместе с тем голограмма содержит в себе в зашифрованном виде объемное (и даже цветное) изображение объекта.

Образование видимого изображения с помощью голограммы называется стадией восстановления. Чтобы увидеть изображение объекта в пространстве, голограмму просвечивают, словно диапозитив, опорным пучком света (рис. 28.9).

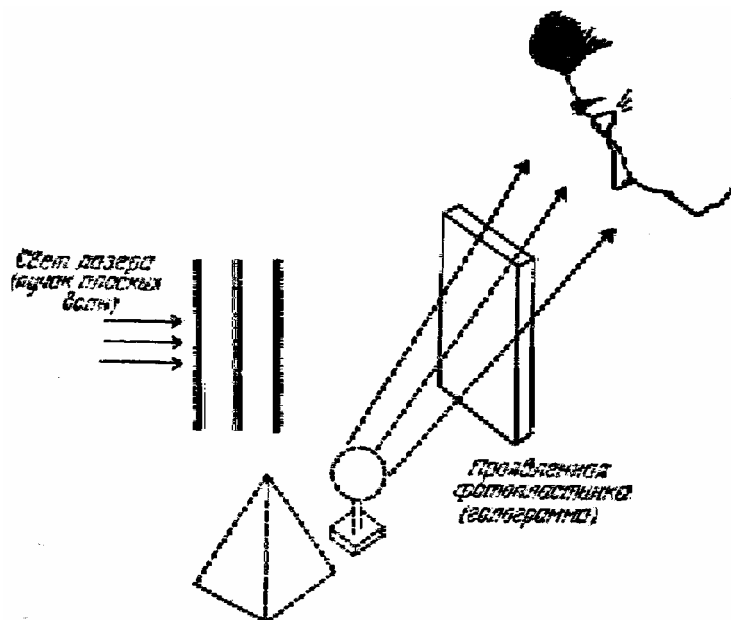


Рис.28.9. Схема восстановления изображения, зафиксированного на голограмме.

Под углом к освещающему пучку появляется изображение. Наблюдатель видит объемный объект висящим в пространстве. На него можно смотреть из разных положений, под разными углами через «окно» - голограмму. Если во время экспозиции близкие предметы закрывали более далекие, то, меняя положение глаз относительно голограммы, наблюдатель может заглянуть за «мешающие» предметы и увидеть ранее скрытые детали. Изображения, получаемые в голографии, обладают и др. интересными свойствами:

1. Например, если голограмму расколоть на несколько кусков, то каждый из них при просвечивании дает ту же исходную картину, только четкость и ощущение объемности ослабевают. (Каждая точка голограммы содержит информацию о всем объекте и каждая точка объекта рассеивает свет на всю фотопластинку).
2. Голограмма дает только позитивное изображение, даже если ее «отпечатать» и получить негатив голограммы.
3. На одной фотопластинке можно получить последовательно несколько изображений и каждое из них можно восстановить без помех со стороны других изображений. Это позволяет получить цветное изображение, как совмещение изображений, полученных с помощью трех основных цветов (красный, желтый, синий), неважно - сразу тремя или по отдельности.

В качестве источника освещения раньше использовался только лазер как источник высококогерентного излучения. Теперь научились получать в пленках голограммы при солнечном освещении. Солнечным освещением изображение и восстанавливается.

**Применения:** кроме всем понятного способа сохранения информации о высокохудожественных изделиях и с целью защиты от подделок возможна высокоскоростная импульсная фотография (лазер с периодичностью и длительностью импульса  $\sim 10^{-8}$  сек). В далекой перспективе – голографическое кино с эффектом присутствия зрителя. Производится исследование напряжений в моделях и деталях.

Разрабатывается рентгеновский голографический микроскоп с теоретическим увеличением  $10^6$ .

Уже применяется голография для контроля точности изготовления изделий: сравнивают голограмму эталона (часто – построенную теоретически, с помощью ЭВМ) с изображением реального контролируемого изделия. Малейшие отклонения дают изменения в интерференционной картине, возникающей при наложении голографического изображения на предмет.

За изобретение голографии в 1971 году Деннису Габору была присуждена Нобелевская премия.