

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

ОПТИЧЕСКИЕ МАЗЕРЫ *)

А. Шавлов

Эти приспособления генерируют свет таким образом, что открывают совершенно новую сферу применения электромагнитного излучения. Примечательная особенность излучаемого ими света заключается в том, что волны этого света совпадают по фазе.

По крайней мере уже полвека инженеры связи мечтают иметь приспособление, которое могло бы генерировать световые волны так же эффективно и точно, как могут быть генерированы радиоволны. Навряд ли может быть больший контраст «загрязненности» и чистоты электромагнитных волн, чем в случае волн, излучаемых обычной лампочкой накаливания, с одной стороны, и электромагнитных волн, испускаемых электронным генератором радиочастот, с другой. Радиоволны от электронного генератора вмещаются в очень узкий интервал электромагнитного спектра и настолько свободны от «шума», что могут быть использованы для передачи сигналов. В противоположность им, все обычные источники света являются, по существу, генераторами шума, которые не могут служить ни для чего более, кроме как для грубых сигнальных целей. И только в течение последних лет с развитием «оптических мазеров» стало возможным более точное управление процессом генерации световых волн. Хотя оптические мазеры появились лишь недавно, они уже сейчас обеспечивают чрезвычайно интенсивный и остро направленный пучок света. Этот пучок намного монохроматичнее света от других источников. Лучшие оптические мазеры в качестве источника одной частоты конкурируют с самыми лучшими электронными генераторами. Развитие оптических мазеров идет так быстро, что скоро их можно будет применять в самых различных областях: для связи на расстоянии и радаров, в качестве ускорителей специальных реакций в химической технологии.

Для оценки возможностей световых волн, с которыми мы обычно имеем дело, рассмотрим сначала, как они получаются. Все источники света — лампочки накаливания, дуги и тому подобные — по существу нагретые вещества. Правда, в обычной неоновой трубке стеклянные стенки остаются холодными, но электроны и атомы газа внутри трубки ускоряются до больших скоростей, обычно связанных с высокой температурой. Атомы непрерывно «накачиваются» в возбужденные состояния, затем они возвращаются в исходное состояние, теряя энергию и испуская видимый

*) A. S c h a w l o w, Optical Masers, Sci. American 204, № 6, 52 (June 1964). Перевод Е. Т. Антропова и Э. Н. Лотковой.

свет. Однако отдельные атомы совершают этот переход независимо друг от друга. Беспорядочное движение атомов, которое мы связываем с понятием нагретого газа, сопровождается беспорядочным испусканием световых квантов или фотонов. Какой именно атом излучит в данный момент, является делом случайным. Возбужденные электроны в горячей вольфрамовой нити лампы накаливания также излучают беспорядочно и независимо. Таким образом, свет, который исходит от любого обычного источника света, называют пространственно некогерентным. Это означает, что свет испускается в виде случайных групп маленьких отдельных волн, которые усиливаются или гаснут друг друга беспорядочным образом; образованный волновой фронт изменяется от точки к точке и непрерывно во времени. Волновой фронт сходен с волновым фронтом, который образуется в пруде, если бросить туда пригоршню гальки; с другой стороны, если бросить в пруд одну гальку, то возникает один круговой фронт. Аналогично сказанному можно вообразить точечный источник света, который может генерировать когерентные волны, фронт которых образует сферическую поверхность. Соответствующий источник мог бы также генерировать когерентные световые волны, фронты которых являются плоскими поверхностями; в каждой точке поверхности напряженность электрического поля будет одинаковая. По мере прохождения волновых фронтов через определенную точку пространства напряженность поля возрастает или убывает плавно и ритмично в фазе, переходя по величине от положительного к отрицательному значению. Если обычный электронный генератор, который образует радиоволны, подсоединен к маленькому излучателю соответствующей конструкции, излучатель будет излучать сферические когерентные волны. При желании генератор может быть подсоединен для питания нескольких излучающих антенн, которые будут излучать направленную волну, очень похожую на плоскую.

Чтобы получить направленную волну от источника некогерентного света, нужно начать с источника малых размеров. Затем путем помещения экрана с отверстием на некотором расстоянии от источника мы можем выделить сегмент волны, который случайно оказывается идущим в желаемом направлении. С другой стороны, свет, излучаемый малым источником, может быть сфокусирован с помощью зеркала или линзы, с тем, чтобы получить пучок с приблизительно параллельными сторонами. Край пучка, создаваемого дуговой лампой и шестифутовым зеркалом, расходятся на угол приблизительно в один градус. Как мы увидим, излучение оптического лазера и более направленно, и более когерентно.

Возможно, самый основной недостаток обычных источников света — это присущая им низкая яркость. Независимо от того, как высока их температура, они не могут излучать больше энергии, чем идеальный излучатель. Теоретическое излучение идеального излучателя, называемого черным телом, дается знаменитой кривой излучения черного тела, впервые установленной Максом Планком. Видимая поверхность Солнца, например, ведет себя подобно черному телу с температурой 6000°. Общая солнечная радиация во всех длинах волн — 7 квт с 1 см² его поверхности; вне зависимости от того, как мы собираем и концентрируем солнечный свет, невозможно достигнуть сколько-нибудь большей плотности излучения.

Хотя семь киловатт представляют собой значительную энергию, она, по сути дела, не столь велика, если учесть громадную ширину солнечного спектра. Сравним для ясности ширину видимого диапазона электромагнитного спектра с шириной стандартного телевизионного канала, которая составляет 4 Мгц. Небольшой расчет показывает, что видимый участок спектра между длинами волн 4000 и 7000 Å может содержать 80 миллионов телевизионных каналов. Другими словами, каждый ангстрем имеет шири-

ну примерно $100\,000\text{ Мгц}$. Если бы было возможно выделить узкую полосу шириной в 1 Мгц в области зеленого света, где Солнце излучает максимальную энергию (около 4800 \AA), то обнаружилось бы, что каждый см^2 солнечной поверхности производит всего лишь 10^{-5} вт . Для получения одногодичного ватта мощности в зеленом свете в полосе 1 Мгц пришлось бы собрать и отфильтровать зеленый свет с 10 квадратных ярдов солнечной поверхности. В противоположность этому, искусственные передатчики, работающие в телевизионном диапазоне спектра радиоволн, могут без затруднений генерировать 10^4 вт в полосе, ширина которой значительно уже 1 Мгц . Обычные источники света подобны Солнцу: они представляют собой широкополосные шумовые генераторы, рассеивающие свою мощность в широком диапазоне частот, не сообщая большой мощности какой-нибудь отдельной частоте. Даже газоразрядные лампы, излучающие свет в ограниченном числе узких линий в спектре, как источники мощности, заключенной в узкую полосу частот, не идут в сравнение с лучшими электронными генераторами. Предпринимались, разумеется, неоднократные усилия для продвижения электронных генераторов в более коротковолновый диапазон. Длина наикратчайшей волны, которая еще может быть произведена электронными средствами, составляет около 1 мм , или 10 млн. ангстрем. Все попытки получить более короткие волны с обычными электронными устройствами наталкивались на значительные трудности. Основной из них является трудность изготовления резонансных конструкций, которые служили бы для настройки генератора. Размер этих конструкций лишь в редких случаях может превышать длину волны. В случае миллиметровых волн они уже столь малы, что их трудно изготовить с достаточной точностью. Для производства оптического излучения с длиной волны на три порядка короче требуется совершенно иной подход.

Заманчивая возможность решения проблемы могла бы заключаться в том, чтобы не создавать эти ничтожно малые резонаторы, а заменить их атомными или молекулярными резонаторами. Природа обеспечила нас громадным разнообразием подобных резонаторов для инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областей. В самом деле, для инженера использование атомных осцилляторов в газоразрядных лампах является обычным делом. Отдельный атом, однако, излучает слишком малую мощность, да и ту лишь прерывистым образом. Необходимо каким-то способом синхронизировать количество атомов таким образом, чтобы они могли работать вместе для создания мощной когерентной волны. Такой подход оказался возможным при использовании принципа мазера, открытого Чарльзом Таунсом в Колумбийском университете*). Слово «мазер» означает сокращение из начальных букв слов «microwave amplification by stimulated radiation» (микроволновое усиление путем стимулированного излучения). В первоначальном мазере, созданном в 1954 г. Джеймсом Гордоном, Цайгером и Таунсом, использовались вибрации молекул аммиака для получения микроволновых колебаний точно определенной частоты. Вслед за этим Николас Бломберген из Гарвардского университета наметил практический путь построения так называемого 3-уровневого твердого

*) Краткое изложение теории оптических усилителей излучения (называемых в иностранной литературе «мазерами», «лазерами» и т. п.) и указание на возможность применения данного принципа для усиления радиоволн содержится в авторской заявке В. А. Фабриканта, М. М. Вудниского и Р. А. Бутаевой от 18 июня 1951 г. и 16 июня 1951 г. (приоритетная справка № 0279—2423 М. П. С. С.). Указанный выше принцип усиления излучения был использован Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым для создания молекулярного генератора микроволнового излучения. [Н. Г. Б а с о в, А. М. П р о х о р о в, ДАН СССР 101, 47 (1955); УФН 57, 485 (1955); ЖЭТФ 30, 560 (1956).] Ими же разработана подробная теория молекулярного генератора. (Прим. перев.)

мазера для использования его в качестве микроволнового усилителя с низким уровнем шумов.

Первый мазер такого типа был построен в лаборатории компании Bell Telephone Laboratories Джорджем Фехером, Сковиллом и Зайделем, и затем было сконструировано много других. Радиоастрономы нашли их особенно ценными для усиления очень слабых радиосигналов из космоса.

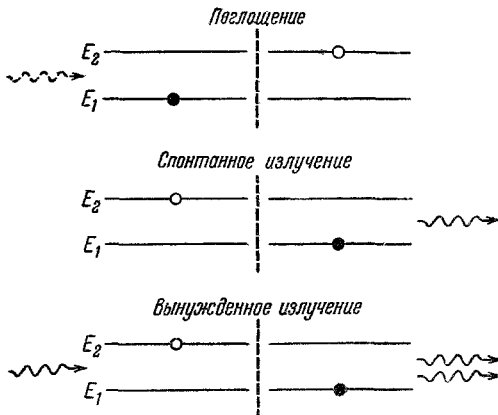


Рис. 1. На этом рисунке процесс индуцированного излучения (внизу), являющийся основой действия мазера, сопоставляется с поглощением (наверху) и спонтанным излучением (в середине). Если атом в «основном» состоянии (черный кружок слева вверху) поглощает фотон (волнистая пунктирная стрелка), то он возбуждается или переходит в более высокое возбужденное состояние (белый кружок справа вверху). Возбужденный атом (в середине слева) может излучить затем энергию спонтанно, эмитируя фотон и возвращаясь в основное состояние (справа в середине). Возбужденный атом (слева внизу) может также быть вынужден излучить фотон, если он испытает удар фотона, пришедшего со стороны. Таким образом, в дополнение к вынуждающему фотону теперь имеется второй фотон той же самой длины волны (справа внизу), и атом возвращается в основное состояние.

атома (рис. 1). Наиболее важным и примечательным является то, что волна после ее испускания находится точно в той же фазе, что и первоначальная волна, обусловившая испускание вторичной. Это явление — наиболее существенный момент самого принципа мазера.

Основной задачей при проектировании мазера является создание «активной среды», в которой большинство атомов может быть приведено в возбужденное состояние, так что электромагнитная волна соответствующей частоты, проходящая через нее, обусловит целую лавину фотонов. Для того чтобы вынужденное излучение доминировало над поглощением, должен быть обеспечен избыток возбужденных атомов. Атомы приводятся в возбужденное состояние путем впуска в систему электромагнитной энергии с длиной волны, отличающейся от наведенной волны; процесс активации называется «подкачкой».

Как только активная среда приготовлена, она может быть заключена в зеркальный ящик или полый резонатор. Тогда волна, начавшаяся у одной из стенок ящика, будет расти по амплитуде, пока не достигнет другой стен-

В прошлом году мазеры были также применены для усиления слабых сигналов при запуске спутника «Эхо».

Индукцированное излучение, представляющее собой основу действия мазера, является обратным процессом по отношению к поглощению электромагнитных волн или фотонов атомными системами. Когда фотон поглощается атомом, энергия фотона переходит во внутреннюю энергию атома. Атом в этом случае переходит в «возбужденное» квантовое состояние. Позднее он может спонтанно излучить эту энергию, эмитируя фотон и возвращаясь в «основное» или в некоторое иное промежуточное состояние. В продолжение периода, когда атом еще возбужден, он может быть «вынужден» эмитировать фотон, если этот возбужденный атом испытает соударение с фотоном, имеющим в точности энергию фотона, который был бы испущен атомом спонтанно. В результате пришедший со стороны фотон или волна получают приращение за счет фотона от данного возбужденного

ки, где она отразится обратно, в массу возбужденных атомов. На стенках неизбежны потери вследствие неидеального отражения. Если усиление вследствие вынужденного излучения достаточно велико для перекрывания этих отражательных потерь, в ящике установится стоячая волна. В сантиметровом диапазоне нетрудно построить ящик, имеющий размеры длины волны и спроектированный таким образом, что установится волна лишь одного определенного вида. Каждый вид колебаний соответствует выходной частоте; добавочные типы колебаний обуславливают дополнительные частоты, или шум, и конкурируют с желаемым типом колебаний, отнимая энергию от источника, возбуждающего атомы.

В оптических длинах волн одноволновый резонатор имел бы очень малые размеры. Чтобы преодолеть это затруднение, Таунс и автор в 1958 г. предложили построить мазер для оптических длин волн путем создания особого вида резонатора, с размерами в тысячи раз большими, чем излучаемая длина волны, но который тем не менее будет выделять вполне определенный тип колебаний. В оптическом мазере зеркальный ящик заменяется устройством или конструкцией с двумя малыми зеркалами, обращенными друг к другу отражающими поверхностями*). Волна, возникающая возле одного из зеркал и путешествующая вдоль оси системы, будет расти вследствие вынужденной эмиссии, пока не достигнет другого зеркала. Здесь она будет отражена обратно в активную среду, так что рост может продолжаться. Если выигрыш при повторных прохождениях достаточно велик для компенсации потерь на зеркалах, то будет развиваться стоячая волна. Если одно из зеркал полупрозрачно, некоторая доля волны может уйти через него, составляя выходную мощность мазера.

Очевидно, возможен случай, когда волна, наклоненная под некоторым углом к оси, покинет систему после всего лишь нескольких отражений или даже без отражения от зеркал. Такая волна не может усиливаться, как усиливается волна, идущая прямо вдоль оси системы. Как и прочие мазерные генераторы, оптический мазер, описанный мною и Таунсом, запускался бы первым фотоном, испущенным спонтанно после того как система «закачана» в активное состояние. (С другой стороны, мазер, предназначенный для работы в качестве усилителя, использует в качестве иницирующей волны внешний сигнал.)

Мы имели все основания рассчитывать, что излучение идеального оптического мазера, сконструированного по такому принципу, было бы строго направлено, очень мощно, в основном монохроматично и, сверх того, когерентно. Излучение было бы направленным, потому что излучаемые волны должны были бы повторить прохождение, возможно, тысячи раз, без отклонения слишком далеко от оси мазера. Оно было бы очень мощным, потому что возбуждаемое излучение заставляет возбужденные атомы излучать много раньше, чем они излучили бы спонтанно. Оно было бы очень монохроматичным, потому что наведенное излучение является резонансным процессом и осуществляется наиболее интенсивно в центре полосы частот, которая может быть эмитирована в спонтанном излучении. Эти преимущественные частоты будут вызывать излучение тех же частот, так что волна, усиленная в мазере, будет содержать только чрезвычайно узкую область частот или длин волн.

Наконец, излучение оптического мазера, поскольку оно хорошо аппроксимируется плоской волной, идущей в выбранном направлении, будет пространственно когерентным, потому что все волновые фронты

*) Идею помещения активной среды между двумя отражающими параллельными стенками для увеличения коэффициента усиления микроволнового мазера и выделения плоской волны впервые высказал А. М. Прохоров (ЖЭТФ 34, 1658 (1958)). (Прим. перев.)

располагаются перпендикулярно к направлению распространения. Пока излучение лазера близко к монохроматическому, оно когерентно также и во времени. Это означает, что имеется фиксированное фазовое соотношение между группой волн, излучаемых в определенный момент времени, и другой группой волн, излучаемых спустя определенный временной интервал. Для волны с периодом 1 сек гребни следуют один за другим через односекундные интервалы. С другой стороны, если частота изменяется, интервалы между максимумами нерегулярны. Чем ближе волна к монохроматической, тем более она когерентна.

Проверка этих предсказаний требовала приготовления активной среды, которая на опыте могла показать действие лазера в оптической

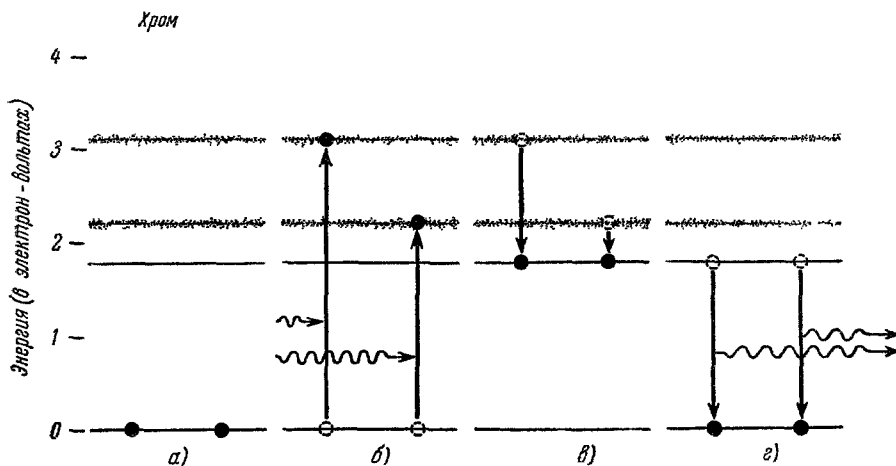
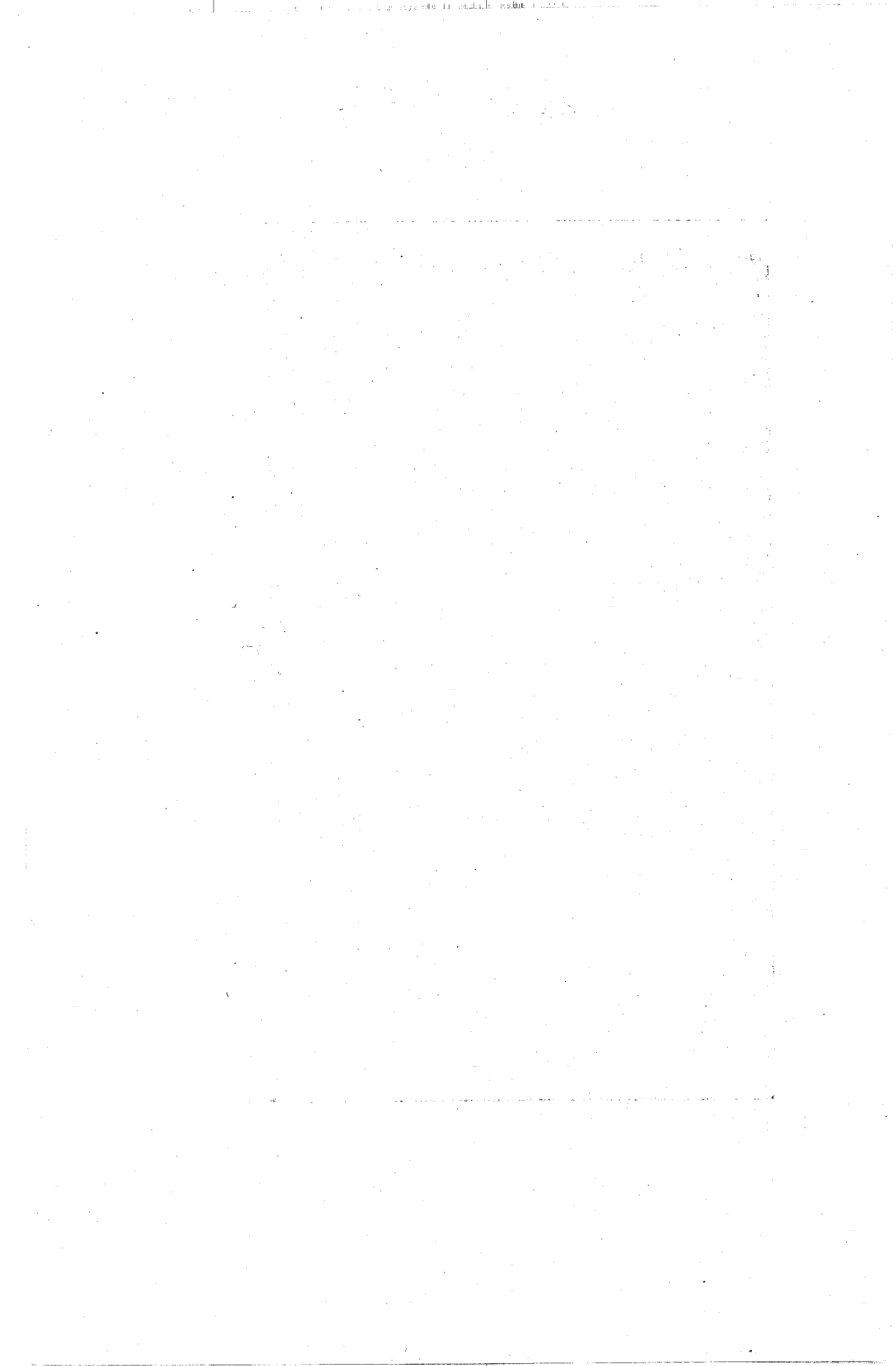


Рис. 2. Атомы хрома (черные кружки) в кристалле рубинового лазера «закачиваются» на более высокие энергетические уровни и затем вынуждаются к эмиссии фотонов, образующих лазерный луч. Атомы в основном состоянии (а) поглощают фотоны (волнистые стрелки), которые «накачивают» их на одну из двух энергетических «полос» (б). Атомы отдают часть своей энергии кристаллической решетке и переходят на метастабильный энергетический уровень (в). Под действием фотонов от других атомов хрома они излучают фотоны характерной длины волны и переходят в основное состояние (г).

области спектра. Первое сообщение об успехе было сделано в июле 1960 г. Т. Майманом, который воспользовался кристаллом рубина*). В промежутке между июлем и концом 1960 г. были испробованы различными исследователями четыре других вещества. Все эти устройства использовали идею отражающих конечных стенок, описанную выше. В конечном счете генерация с помощью оптических лазеров была осуществлена на 11 различных длинах волн. Похоже, что к этим волнам скоро будут присоединены многие другие.

Рубиновый лазер Маймана является типичным лазером с использованием кристаллов. Рубин — это окись алюминия, в которой несколько алюминиевых атомов замещено атомами хрома; чем больше хрома, тем гуще краска. Майман использовал бледно-розовый рубин, содержащий около 0,05% хрома. Цвет получается от того, что атомы хрома в кристалле поглощают наряду с ультрафиолетовым светом зеленый и желтый цвет и пропускают только красный и синий. Более того, поглощенный свет переводит атомы хрома в возбужденные состояния, из которых для

*) Общеизвестно, что приоритет в применении рубина для лазеров принадлежит А. М. Прохорову и Н. Г. Басову. (Прим. перев.)



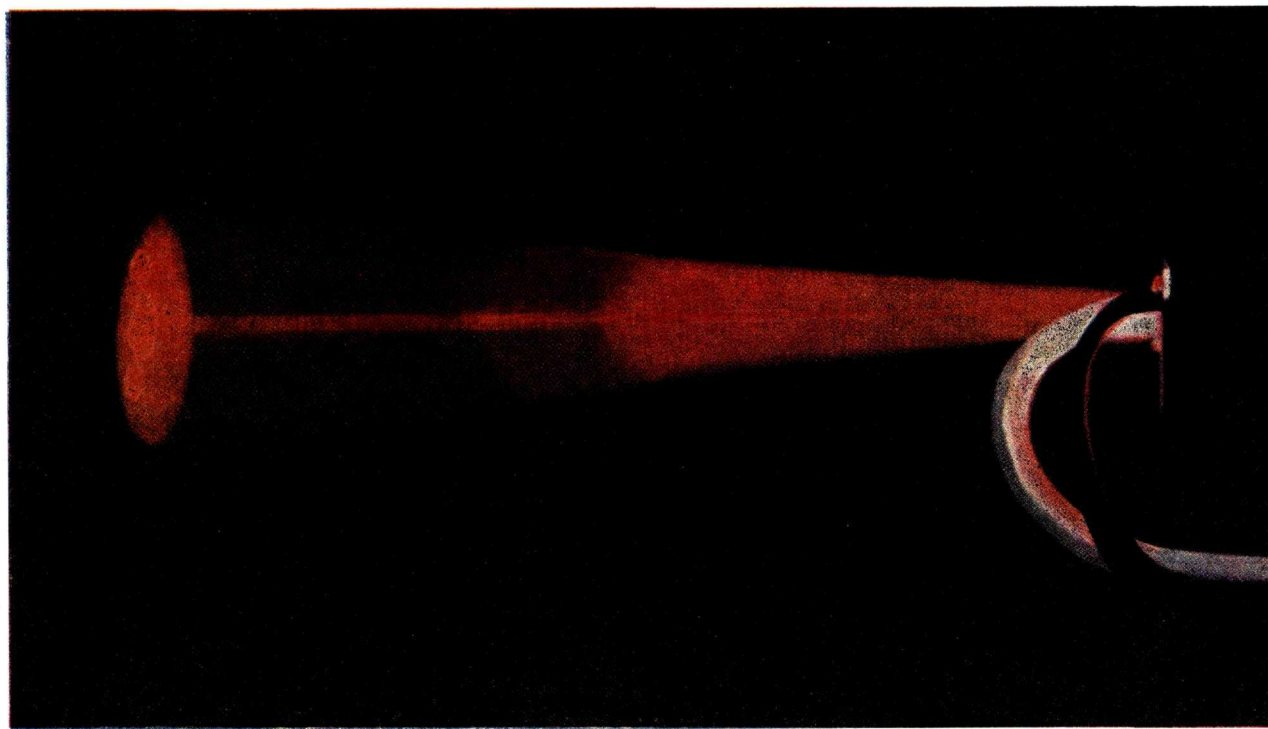


Рис. 3. Луч оптического мазера на рубине оставляет красный светящийся след, проходя сквозь дым. Верхний конец изогнутой трубки системы охлаждения укреплен на передней стороне кожуха мазера, который сам невиден на рисунке. Кристалл рубина закреплен в кожухе.

возвращения в исходное состояние требуется две стадии. В первой стадии они отдают часть своей энергии решетке кристалла и остаются временно в так называемом метастабильном состоянии. Если они не вынуждаются к излучению, то они пребывают в этом состоянии несколько миллисекунд, пока не перейдут случайным образом в основное состояние. Фотоны, испущенные во время этого конечного перехода, имеют длину волны (при комнатной температуре) 6943 \AA , чем и объясняется характерная красная флуоресценция кристаллов рубина. В оптическом лазере, однако, впервые несколько фотонов с этой длиной волны стимулируют возбужденные атомы хрома отдать фотоны и опуститься в основное состояние гораздо быстрее, чем это произошло бы в обычном случае; в результате образуется каскад фотонов с длиной волны 6943 \AA (рис. 2).

Для использования в оптическом лазере розовый рубин вытачивается в форме стерженька длиной около четырех сантиметров и полсантиметра в сечении. Концы его отполированы оптически плоскими и частично посеребрены. Стержень помещается около электронной импульсной лампы, которая дает широкополосный подкачивающий свет (рис. 4 и 5). Майман раньше всех открыл, что наиболее мощные из этих ламп, будучи присоединены к мощному питанию, способны перевести в возбужденное состояние большинство атомов хрома. Вплоть до определенной критической интенсивности вспышки происходит лишь то, что рубин испускает пучок своей типичной красной флуоресценции на протяжении обычного периода жизни возбужденных атомов. Но выше критического уровня действие лазера преобладает и сильный красный пучок света, свечение которого длится около половины тысячной секунды, выходит из частично посеребренных концов стержня (рис. 3). Это указывает на то, что в возбужденное состояние был «накачан» достаточный избыток атомов, чтобы скомпенсировать потери при отражениях на концах.

В 1959 г. автор предсказал, что можно построить оптический лазер, используя темно-красный рубин, который содержит хрома в 10 раз больше, чем розовый рубин. Было предсказано, что при этих более высоких концентрациях «лазерное» действие будет иметь место одновременно при двух разных длинах волн — 7009 и 7041 \AA (рис. 6). Это было недавно осуществлено в лазере, построенном Г. Дэвлином и автором, и в другом лазере, построенном И. Видером и Л. Сэрлсом. Кроме того, другие твердые оптические лазеры с применением ионов самария или урана в кристаллах фторида кальция были созданы П. П. Сорокиным и М. Т. Стивенсоном в исследовательской лаборатории компании International Business Machines. Эти лазеры генерируют на длинах волн 7080 и $25\,000 \text{ \AA}$ соответственно.

Все эти лазеры действовали сначала в коротких вспышках, но они, по-видимому, потенциально способны действовать и непрерывно. Однако активная среда, используемая Майманом, менее подходит для этой цели, чем другие среды, в которых индуцированное излучение происходит при переходах на промежуточный энергетический уровень, расположенный на некотором расстоянии над основным состоянием.

Таким образом, нет необходимости тратить много энергии, «выкачивая» половину атомов из основного состояния, чтобы излучение могло превосходить поглощение. В новых материалах промежуточное состояние, где атомы остаются после испускания фотона желаемой частоты, может быть освобождено просто охлаждением. Отсюда активная среда содержит только небольшое число атомов, «настроенных» поглотить фотоны, образованные действием лазера. Требуется только определенная подкачка, чтобы вызвать это действие.

Совершенно иным путем получают возбужденные атомы в оптических лазерах, использующих атомы газа в электрическом тлеющем разряде

при весьма определенных условиях. В смеси газов гелия и неона можно обеспечить генерацию лазера при нескольких длинах волн в инфракрасной области около 10 000 Å. Эта система была предложена в 1959 г.

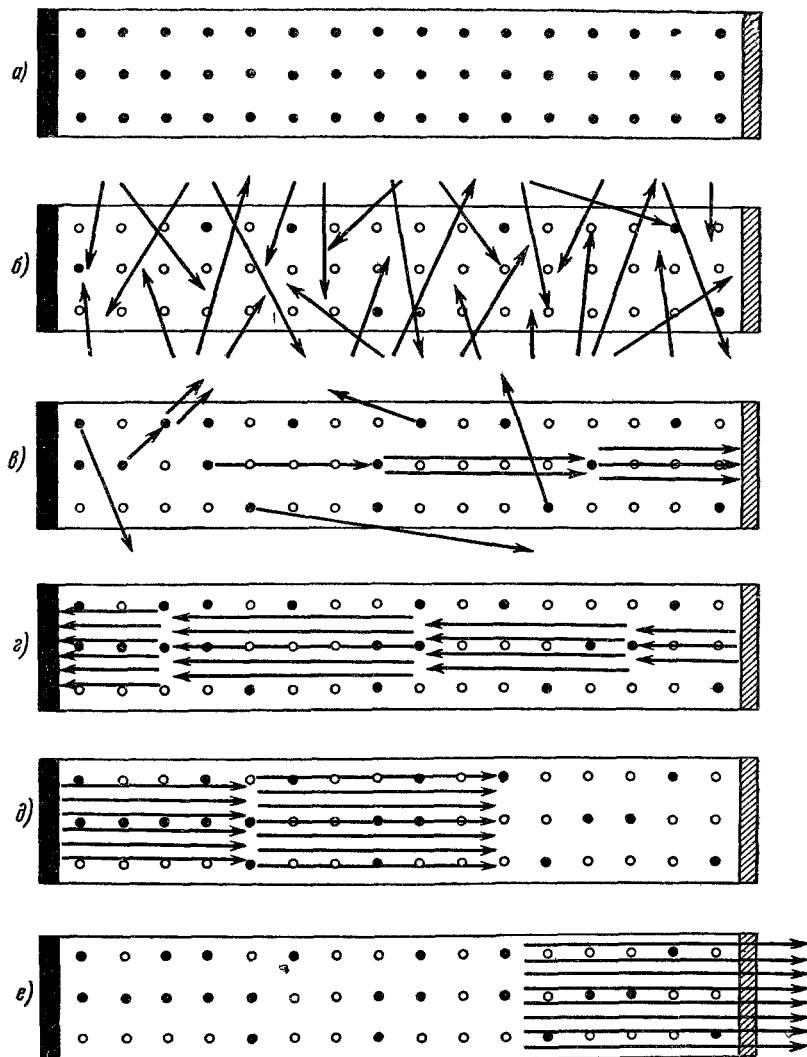


Рис. 4. Каскад фотонов в твердом оптическом лазере усиливает световую волну за счет вынужденного испускания. До того как каскад начался (а), атомы в кристалле лазера находятся в основном состоянии (черные кружки). Подкачивающий свет (стрелки в «б») переводит большинство атомов в возбужденное состояние (белые кружки). Каскад начинается (с), когда один из возбужденных атомов спонтанно испускает фотон (стрелка в «с») в направлении параллельно оси кристалла. (Фотоны, излученные в других направлениях, уходят из кристалла.) Фотон вынуждает другой атом к испусканию второго фотона: этот процесс продолжается (з и д), пока фотоны отражаются взад и вперед между концами кристалла. Если усиление достаточно велико, некоторая доля луча выходит наружу через частично посеребренную концевую поверхность кристалла (е).

Али-Джаваном в компании «Bell Telephone Laboratories» и успешно осуществлена им совместно с В. Беннетом, Л. Хэрриотом в начале этого года.

Характерная особенность этого мазера заключается в его способности действовать непрерывно и с очень небольшой подводимой мощностью—около 50 *вт* в первой модели *) (рис. 7).

В мазере Джавана индуцированное излучение появляется, когда в атомах неона осуществляются переходы между двумя промежуточными уровнями, из которых нижний довольно-таки далек от основного состояния. Требуется только небольшой приток энергии, чтобы вызвать газовый разряд — точно так же, как в обычной неоновой рекламе — и это, в свою очередь, дает непрерывный приток атомов неона в соответствующее состояние возбуждения, необходимый для образования непрерывного «мазер-

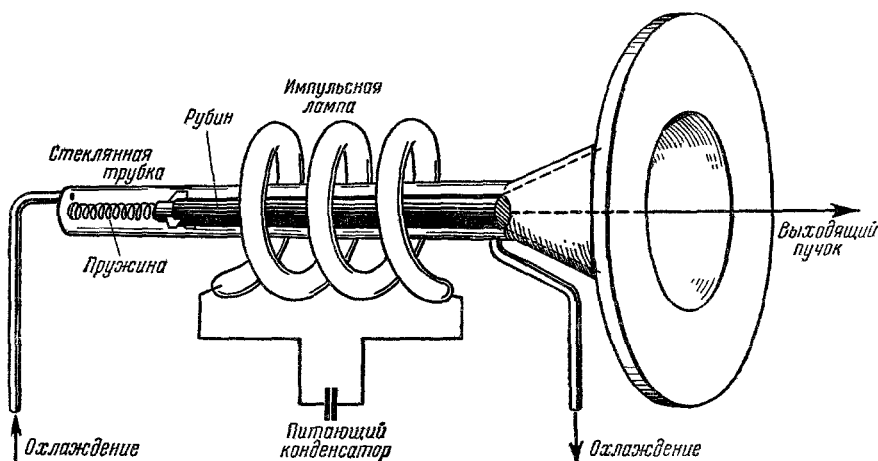


Рис. 5. Рубиновый мазер получает «подкачивающую» энергию от импульсной лампы. Выходной луч проходит через частично посеребренный конец рубинового кристалла. Луч образуется при многократном отражении от концов. Для охлаждения рубина применяется жидкий азот, хотя возможна также работа при комнатной температуре. Показана лишь передняя стенка кожуха мазера (справа).

ного» потока. Так же как и в рубиновом мазере, луч образуется и делается когерентным путем прохождения туда и сюда между отражающими пластинками на концах трубки (рис. 7).

Гелиево-неоновый мазер свидетельствует о появлении тонкостей в различных мазерных конструкциях. Энергия, необходимая для перевода атома неона в возбужденное состояние, не поставляется непосредственно входящим фотоном; она приобретает путем столкновения с возбужденным атомом гелия (рис. 8). Существует еще много других возможностей. Энергетические уровни для мазеров могут быть найдены в самых различных системах. Например, в инфракрасной области спектральные линии образуются колебаниями газовых молекул, колебаниями кристалла и путем электронных возбуждений определенных атомов в кристаллах. Какие из них могут быть использованы в мазере, может быть определено только после тщательного изучения спектра системы.

*) Впервые применение тлеющего разряда для получения активной среды было практически осуществлено Бутаевой и Фабрикантом в парах ртути (Сб. исследований по экспериментальной и теоретической физике памяти Г. С. Ландсберга, М., изд. АН СССР, 1957, стр. 63). Аблеков, Песин, Фабелинский осуществили активную среду в видимой области спектра, используя газовый разряд в смеси ртути и цинка (ЖЭТФ 39, 892 (1960)). (Прим. перев.)

Теперь, когда оптические мазеры построены, насколько соответствуют они предположениям о мощности, направленности, когерентности и узости полученных пучков? Больше всего мы знаем о розовом рубине. В коротких

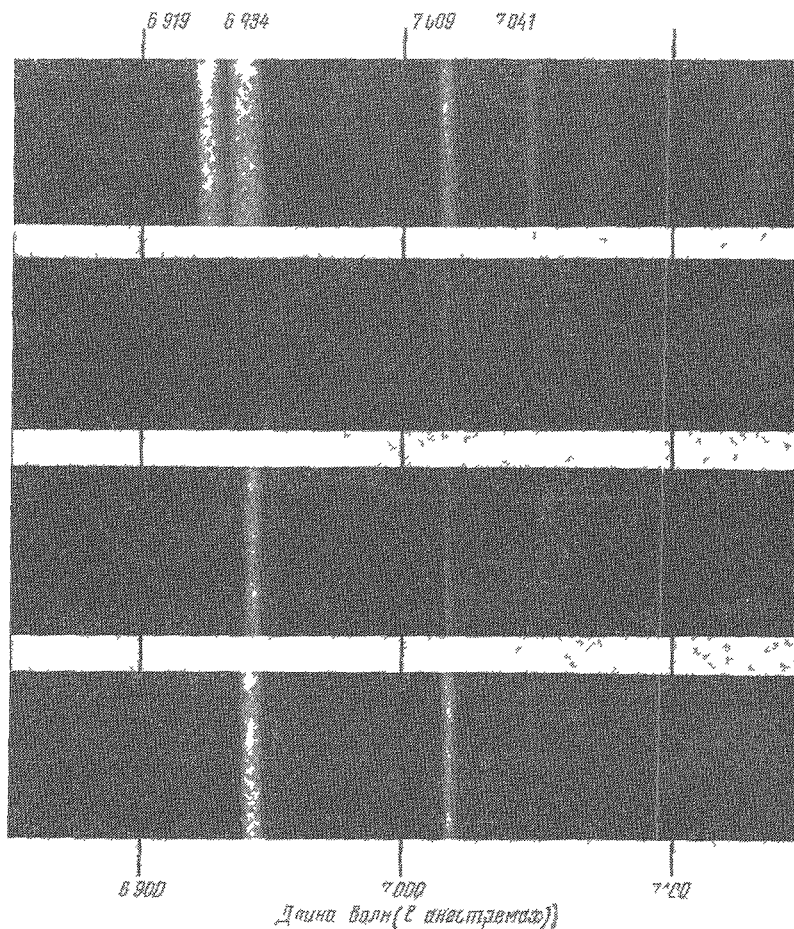


Рис 6 Спектры рубинового лазера на трех нижних фотографиях сравниваются со спектрами спонтанной (невынужденной) флуоресценции рубина—верхний снимок. Как только подкачивающая мощность достигает первого порогового значения для «мазерного» действия (второй снимок сверху), рубин генерирует на волне 7009 Å, по мере увеличения мощности возбуждаются уже две длины волны (третий снимок сверху) и затем три (снимок внизу). Генерация лазера на волне 6919 Å никогда не наблюдается. Последовательность появления спектральных линий варьируется при замене кристалла лазера и условий работы. Для фотографирования спектра флуоресценции были необходимы 30 секундные экспозиции. Три нижних снимка были получены за одну вспышку продолжительностью 0,0005 сек.

вспышках его выходная мощность достигает 10 000 *вт* для луча с сечением меньше квадратного сантиметра. Стороны пучка параллельны с расхождением менее половины градуса; при меньших мощностях расхождение падает приблизительно до одной двадцатой градуса. Такое расхождение соответствует размыванию только в пять футов на одну милю, и оно может быть

уменьшено пропусканием луча через телескоп в направлении, обратном обычному. С телескопическим уменьшением должно быть нетрудно спроектировать на Луну пятно света диаметром только в две мили. Если нужно, то мощность лазера может быть сфокусирована для получения интенсивного нагрева. Например, линза с фокусным расстоянием в один сантиметр сфокусирует пучок в пятнышко диаметром только в одну сотую сантиметра, соответствующим площадью в одну тысячную квадратного сантиметра. В этом пятнышке пучок лазера создает мощность плотностью 100 млн. ватт на квадратный сантиметр. Если вспышка короткая, мощность ее в тысячи раз больше, чем может быть получена фокусированием солнечного света, и достаточна, чтобы оплавить или испарить вещество с поверхности самого

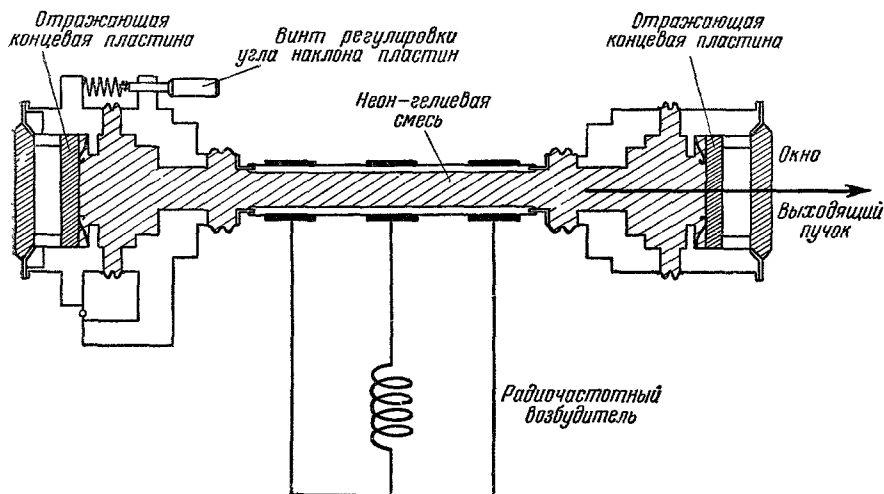


Рис. 7 Успешная работа газового лазера зависит от правильного выбора неон-гелиевой смеси, обеспечивающей активную среду. Возбудитель на радиочастотах подводит к среде энергию. Выходной луч возникает при многократных проходах взад и вперед между отражающими концевыми пластинами.

тугоплавкого материала. Впервые это было продемонстрировано моим коллегой В. Бойлем (рис. 10). Неудивительно, что рубиновый лазер отстает от идеальных представлений в нескольких аспектах, особенно в узости производимого пучка по длинам волн. Вследствие того, что он подвергается громадной импульсной нагрузке, рубиновый стержень заметно нагревается. Несмотря на это, когда достигается порог лазера, полоса длин волн сужается до 0,02 Å, или 1000 Мгц. Это такая же ширина, как и у самой узкой спектральной линии от немазерного источника света.

Спектральная ширина выходного пучка рубина намного больше спектральной ширины пучка газового лазера Джавана, Беннета и Хэрриота. Этот лазер дает спектральные линии шириной меньше чем 1 мкц при несущей частоте 100 000 Мгц. Для газового лазера выходная мощность на 1 мкц килоцикл ширины полосы в 100 раз больше мощности, испускаемой квадратным сантиметром солнечной поверхности. Частота выходящего света лазера может слегка смещаться со временем, но за короткий интервал она заметно стабильна; в радиодиапазоне такая стабильность достигается лишь с помощью лучших частотных стандартов или атомных часов.

Из всех свойств оптического лазера самым поразительным является пространственная когерентность его света. Это легко продемонстрировать, используя лазер в повторении классического опыта интерференции на двух щелях, поставленного Томасом Юнгом в 1806 г., чтобы показать,

что свет состоит из волн. В опыте Юнга свет проходит через две параллельные щели и затем падает на экран. Если световые волны от одной щели достигают точки на экране в фазе со световыми волнами от другой щели, две группы волн усиливаются, давая яркое пятно. В соседней точке на экране, где свет от одной щели прошел путь на полволны больше, чем свет от другой щели, волны гасят друг друга, давая темное пятно. Таким образом, на экране образуются чередующиеся темные и светлые пятна. Обычно при проведении этого эксперимента небольшой источник света помещается на некотором расстоянии от щелей, так что дошедший до них

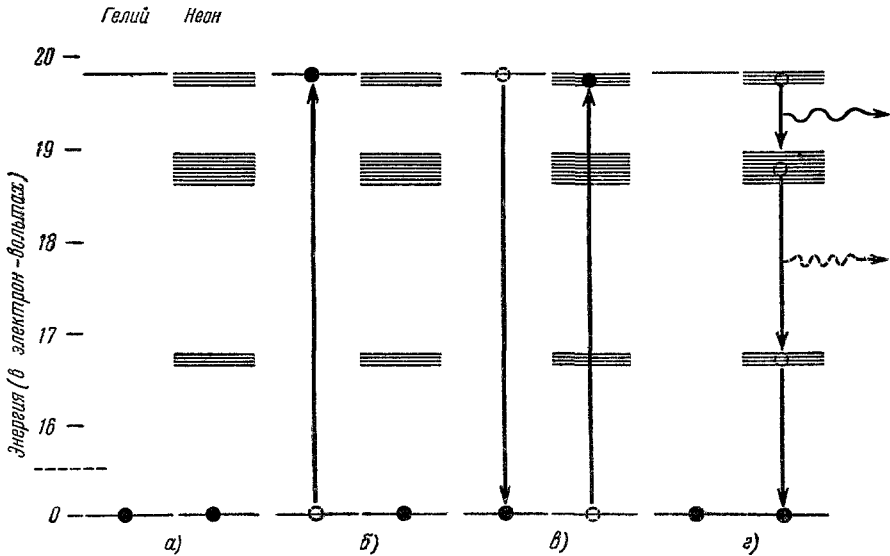


Рис. 8. Атомы гелия и неона (черные кружки) образуют активную среду газового лазера. Сначала оба атома находятся в основном состоянии (а). Атомы гелия накачиваются электронной бомбардировкой на более высокий энергетический уровень (б). При соударении атомов гелия и неона гелий теряет свою энергию и передает ее неону, который переходит на один из четырех различных энергетических уровней (в). При вынуждении внешними фотонами неон добавляет еще один фотон (волнистая стрелка наверху в «г») к лазерному лучу и переходит на один из десяти энергетических уровней. Неон затем возвращается в основное состояние по ступеням; фотон, излучаемый в первой ступени (пунктирная стрелка), не добавляет ничего к лазерному лучу.

фронт волны распространяется почти перпендикулярно к их плоскости. Если источник слишком большой или слишком близок к щелям, пятна могут не появиться. Итак, опыты Юнга являются хорошей проверкой перпендикулярности волновых фронтов и когерентности волн. Когда проводится эксперимент с оптическим мазером, щели могут быть помещены непосредственно на поверхности, из которой выходит пучок, и образуются четкие интерференционные пятна (рис. 11). Пятна хорошо согласуются с расчетными данными при предположении об абсолютной когерентности на промежутке между щелями. В действительности в рубиновом стержне область когерентности обычно ограничивается неправильностями кристалла и составляет около десятой доли диаметра стержня. Однако в газовых лазерах когерентность простирается на протяжении всей ширины конечных пластинок.

Оптические лазеры — это такой новый вид источника света, что трудно даже перечислить все его возможные применения. Осуществление связи на расстоянии, конечно, одно из наиболее полезных применений

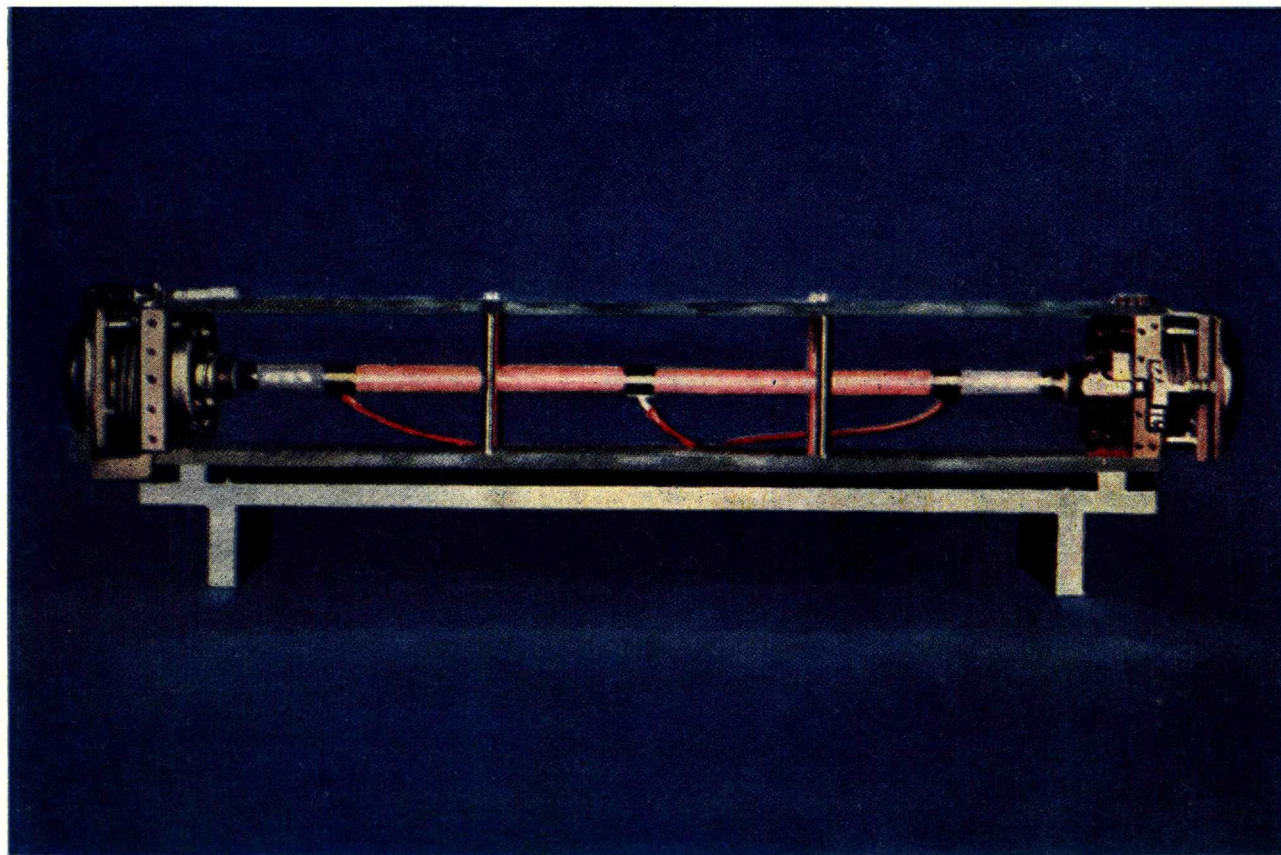
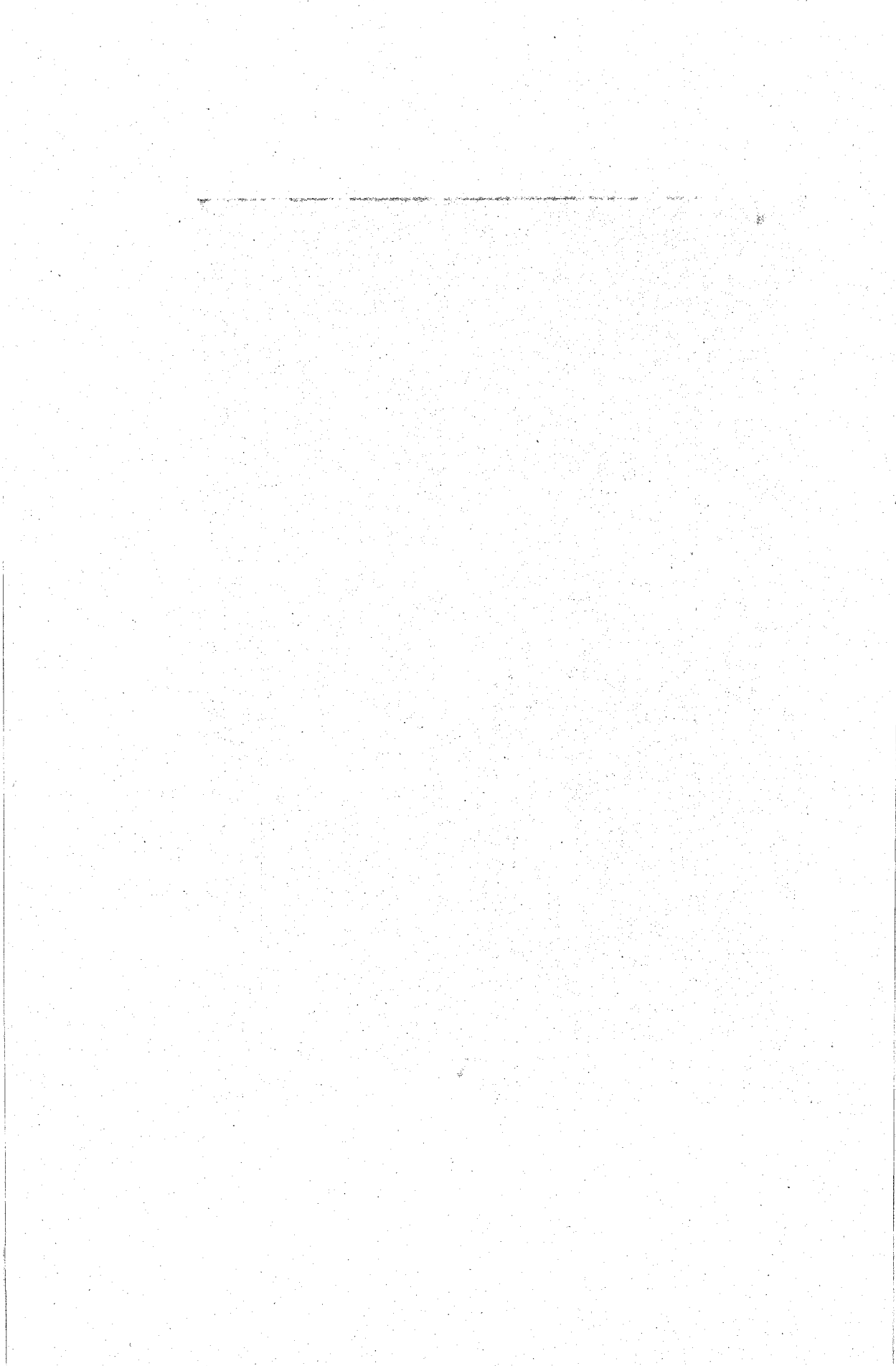


Рис. 9. В газовом оптическом лазере используется смесь гелия и неона для получения инфракрасного луча. Красноватое сияние происходит от газового разряда в смеси. Газовый лазер, спроектированный Али Джава- ном, В. Беннетом и Д. Хэриоттом, был первым лазером, способным работать непрерывно.



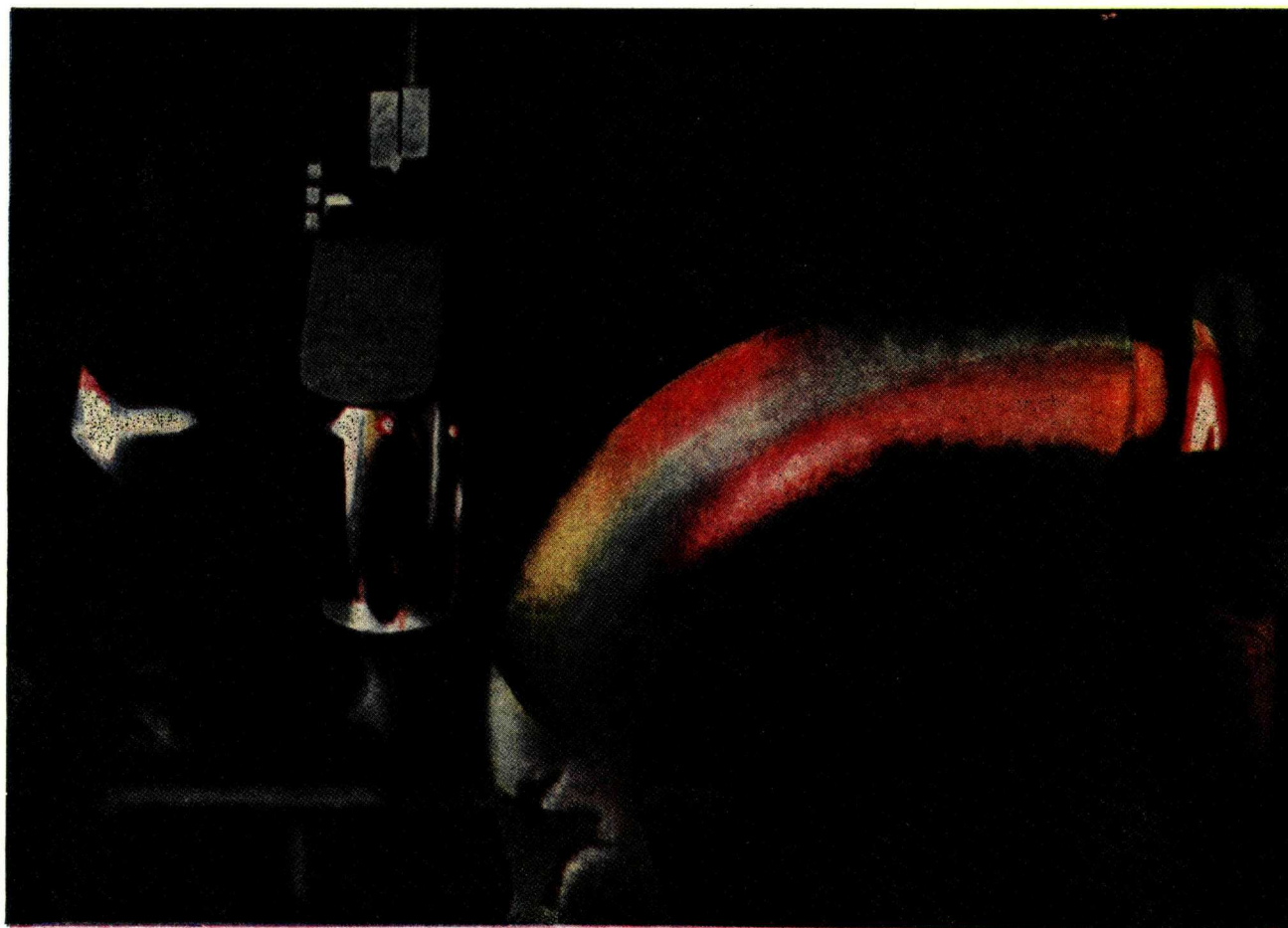
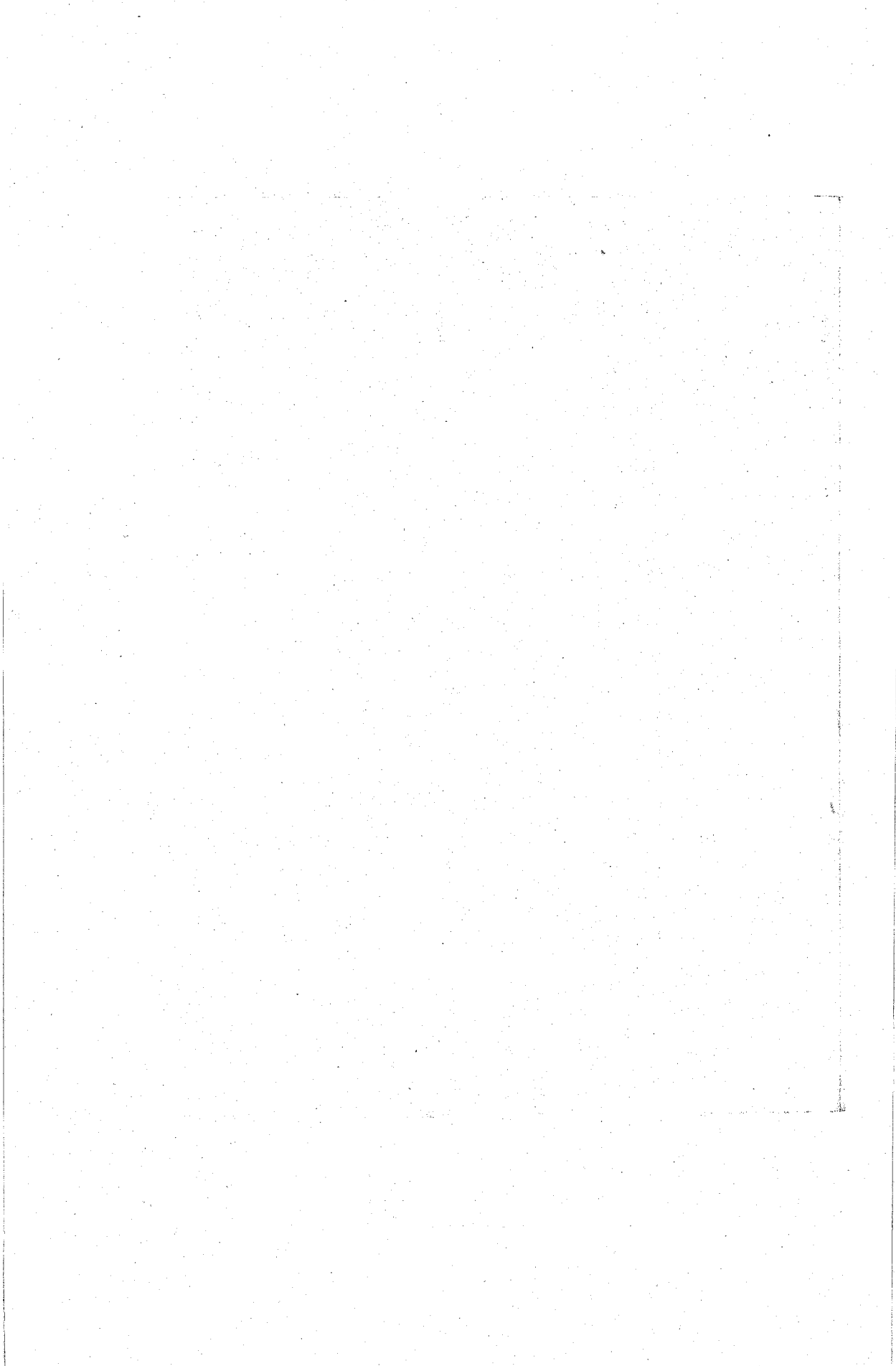


Рис. 10. Яркое бело-голубое пламя слева — раскаленные пары углерода, полученные при фокусировании луча рубинового лазера на мишень из углерода. Луч нагревает участок поверхности мишени примерно до 8000°C за $0,0005\text{ сек}$. Большой изогнутый предмет справа — это та же самая трубка охлаждающей системы, которую можно видеть на рис. 3. Слева от трубки установлена маленькая линза, используемая для фокусировки луча.



и заслуживает особого внимания в смысле технического приложения. Сигнализация светом, хотя и применялась еще с древних времен, ограничивалась слабостью и шумами доступных источников света. Поэтому объем информации, которую может доставить световой сигнал, крайне ограничен. Обычный световой луч может быть сравнен с плавной несущей волной, которая уже модулирована шумами от коротких вспышек света, беспорядочно излучаемого отдельными атомами в источнике света. С другой стороны, мазер может давать почти идеальную плавную волну, несущую только то, что вы ей зададите. Если бы можно было найти подходящие методы модуляции, когерентная световая волна была бы способна нести громадный объем информации. Это является следствием того, что частота света очень велика, и даже очень узкая полоса видимого спектра включает громадное число циклов в секунду, а объем информации, который может быть передан, прямо пропорционален числу циклов в секунду, а отсюда — ширине полосы. Здесь надо сделать различие между спектральной шириной полосы немодулированного пучка лазера, или несущей волны (которая, как мы видели,

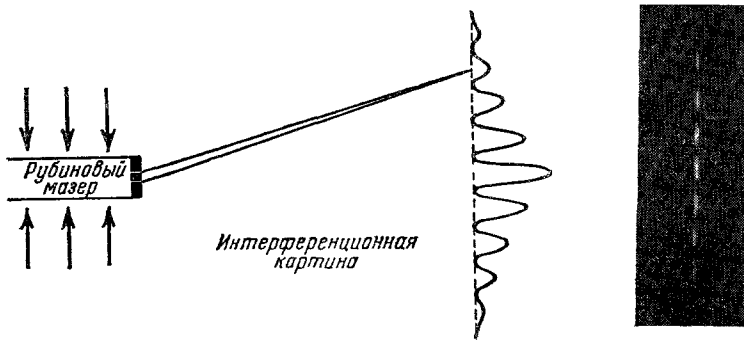


Рис. 11. Интерференционный опыт с двумя щелями показывает, что световые волны, покидающие рубиновый мазер, являются пространственно когерентными или находятся в фазе. Когда две когерентные волны падают на экран после прохождения путей слегка различной длины, они усиливают и гасят друг друга симметричным образом, давая интерференционную картину.

чрезвычайно узка), и шириной полосы, после того как на нее наложен сигнал. В телевизионной передаче несущая полоса частот (которая также очень узка) несет сигнал, который дает эффективную ширину полосы в 4 Мгц . Один пучок лазера может, в принципе, нести сигнал с частотой, или шириной полосы, в 100 тыс. Мгц , предполагая, что может быть найден путь генерирования такого сигнала. Сигнал такой частоты может нести столько информации, сколько все существующие теперь радиоканалы. Надо добавить, что световой луч не проходит достаточно хорошо через туман, дождь или снег. Поэтому имеет смысл световые пучки наземных систем связи заключить в трубы.

Несомненно, найдутся другие области применения оптических мазеров. Очень горячее пятно, получаемое фокусированием пучка оптического лазера, может быть использовано в производстве всякого рода электронных приборов. Например, можно будет сваривать небольшие соединения, после того как они запаяны внутри стеклянной оболочки. Однако в добавление к мощности, выделяемой непосредственно, мазер является интенсивным источником когерентного излучения с электрическим полем очень высокого потенциала. В таких сильных полях атомы и молекулы могут вести себя странным и непредвиденным образом. Поэтому эти пучки

могут быть использованы в очень многих областях исследований. Можно также представить себе использование мазерного пучка в гармонических генераторах или смесителях. В соответствующие смесители можно ввести две частоты, а вывести третью, которая будет отлична от двух первых частот. Таким образом, было бы возможно синтезировать длины волн, которые не могут быть получены непосредственно. Это в конце концов привело бы к супергетеродинным приемникам, способным преобразовывать оптические длины волн в любые желаемые более длинные волны.

Уже несколько лет известно, что если имеется достаточно мощный источник инфракрасной радиации нужной частоты, можно возбудить колебания определенных сортов молекул. Любые другие присутствующие молекулы не будут возбуждены. Так как возбужденные молекулы реагируют более активно, чем другие, можно будет осуществить в высшей степени чувствительный метод управления некоторыми химическими реакциями. До сих пор все существующие источники были слишком слабы для этих целей, а оптические мазеры могут осуществить такое управление в действительности.

Нужно отдать себе отчет в том, что здесь говорилось о целом классе устройств, охватывающих большой диапазон частот, мощностей и ширины полос. Сюда должны входить не только генераторы, но и различного рода усилители. Один вид усилителя может быть использован для усиления светового сигнала, ослабленного прохождением на далеком расстоянии, возможно, через трубы или межпланетное пространство. Другой тип усилителя сможет усилить целое изображение, например, слабое изображение звезды.

Список потенциальных возможностей применения оптических мазеров может быть продлен почти до бесконечности. С изобретением оптического мазера контроль человека над светом достиг совершенно нового уровня. Это даст возможность найти новое применение света, которое до сих пор даже и не снилось.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. L. Schawlow and Ch. H. Townes, Phys. Rev. **112**, 1940 (1958).
 2. J. P. Gordon, Sci. American **199**, № 6, 42 (1958).
 3. A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott, Phys. Rev. Lett. **6**, 106 (1961).
 4. A. Javan, В сб. Quantum Electronics, ed. Ch. H. Townes, Columbia University Press, 1960, стр. 564.
-