

волн с узлами и пучностями. Каждой такой волне соответствует определенный *тип* или, как принято говорить, *мода колебаний*. Это обстоятельство отражается на распределении интенсивности в поперечном сечении пучка лучей, генерируемых лазером. Здесь наблюдается система светлых пятен, разделенных темными узловыми линиями. Это, конечно, усложняет дело. Но мы не будем входить в подробное обсуждение этого вопроса. Заметим только, что наряду с плоскими зеркалами в резонаторах употребляются длиннофокусные *сферические зеркала*. Они могут быть, например, вогнутыми конфокальными зеркалами, т. е. зеркалами, у которых главные фокусы совпадают и находятся в середине системы. Применение подобных зеркал, как показывают опыт и численные расчеты, позволяет значительно уменьшить потери света в лазерах и упрощает их юстировку.

7. Учтем теперь, что в реальном лазере часть света, чтобы ее можно было использовать, должна быть выпущена из активной среды наружу. С этой целью одно из зеркал, например S_2 , делается *полупрозрачным*. Кроме того, и зеркало S_1 лишь частично отражает свет, хотя коэффициент отражения его и близок к 100%. Это приводит к ослаблению светового пучка. Чтобы лазер был генератором света, необходимо, чтобы усиление светового пучка в активной среде превосходило некоторое минимальное — *пороговое* — значение. Именно, должно быть выполнено следующее условие. Световой пучок, вышедший от S_1 , после прохождения туда и обратно через активную среду и отражения от S_1 должен вернуться в исходное положение с неменьшей интенсивностью. Иначе в результате последовательного повторения этих процессов интенсивность пучка будет непрерывно убывать и лазер перестанет генерировать. Поэтому для генерации недостаточно выполнения простого неравенства (120.3). Оно должно быть выполнено с некоторым запасом, т. е. число атомов N_2 на верхнем уровне в единице объема активной среды должно превышать некоторое минимальное — *пороговое* — значение.

Конечно, нарастание интенсивности волны в активной среде не может продолжаться беспредельно, так как заселенность верхнего энергетического уровня ограничена. По мере обеднения атомами верхнего уровня \mathcal{E}_2 скорость нарастания интенсивности волны будет уменьшаться и волна начнет затухать еще до того, как перестанет выполняться условие (120.3).

§ 121. Рубиновый лазер

1. Существует много материалов, применяемых в качестве активных сред в лазерах. Сюда относятся различные диэлектрические кристаллы, стекла, газы, полупроводники и даже плазма. Эта сторона дела подробно изучается в квантовой электронике.

Мы ограничимся описанием устройства и принципа действия только двух лазеров: *рубинового* и *гелий-неонового*.

Первый квантовый генератор света был создан в 1961 г. Мейманом (р. 1927) на рубине. Рубин — это твердый кристалл, основой которого является корунд, т. е. кристалл окиси алюминия (Al_2O_3), в котором небольшая часть атомов алюминия (около 0,05%) замещена ионами хрома Cr^{+++} ¹⁾. Ионы хрома играют основную роль в работе квантового генератора. Корунд — это диэлектрик с широкой запрещенной энергетической зоной между валентной зоной и зоной проводимости (см. т. III, § 100). Энергетические уровни хрома в корунде лежат в этой запрещенной зоне. Они были изучены задолго до создания лазеров. Основным (невозбужденным) уровнем является уровень \mathcal{E}_1 (рис. 346). Он имеет сложную структуру, которая, однако, не играет роли в работе квантового генератора. Выше лежат близкие возбужденные уровни \mathcal{E}_{2a} и \mathcal{E}_{2b} . Это — узкие уровни. При переходе с них на основной уровень \mathcal{E}_1 излучается красный свет с длинами волн $\lambda = 694,3$ и $692,9$ нм. Он-то и придает рубину характерную розовую или красную окраску (в зависимости от концентрации ионов хрома). Более интенсивна линия $\lambda = 694,3$ нм. По этой причине только она и усиливается при работе лазера. Вторая линия не играет роли. Выше уровней \mathcal{E}_{2a} и \mathcal{E}_{2b} расположены две сравнительно широкие полосы энергий \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 . Переходы между уровнями этих полос и основным уровнем \mathcal{E}_1 сопровождаются излучением зеленого и голубого света соответственно.

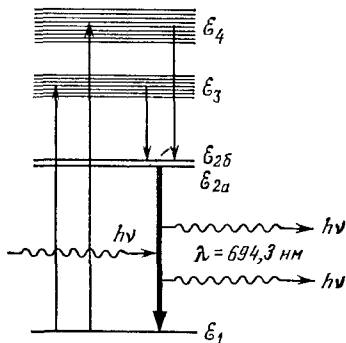


Рис. 346.

2. Инверсная заселенность создается между уровнями \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Для этого используется так называемая *оптическая накачка*, т. е. освещение кристалла рубина мощной вспышкой света. Рубину придают форму цилиндрического стержня с диаметром 0,1—2 см и длиной от 2 до 20 см и больше. Концы стержня тщательно отполированы. Они могут служить зеркалами. Тогда их серебрят, как показано на рис. 345, а. Зеркала могут быть и внешними (рис. 345, б), тогда серебрение не нужно. Для освещения рубинового стержня

1) Для лазеров монокристаллы рубина выращивают искусственно. Смесь Al_2O_3 и Cr_2O_3 в виде пудры сыплется сверху на выращиваемый кристалл рубина, верхняя кромка которого находится в кислородно-водородном пламени горелки с температурой 2050 °С, достаточной для плавления рубина. При медленном опускании кристалла расплавленный слой смеси выходит из пламени и кристаллизуется. Таким путем удается получать монокристаллы рубина в виде стержней длиной до 0,5 м и диаметром до 5 см.

применяют импульсные ксеноновые газоразрядные лампы-вспышки, через которые разряжаются батареи высоковольтных конденсаторов (напряжение 2—3 кВ). Длительность вспышки порядка одной миллисекунды. Лампа-вспышка имеет форму спиральной трубки, обвивающейся вокруг рубинового стержня (рис. 347). Она может быть и прямолинейной. Тогда применяют зеркальные осветители, имеющие форму эллиптических цилиндров с внутренними отражающими поверхностями. Лампа-вспышка располагается вдоль одной из фокальных линий цилиндра; отраженный свет концентрируется на рубиновом стержне, помещаемом вдоль другой фокальной линии.

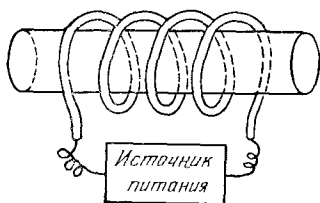


Рис. 347.

Если бы энергетический спектр состоял только из двух уровней \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , то с помощью оптической накачки создать инверсную заселенность их было бы невозможно. Действительно, как видно из (119.2), индуцированные переходы атомов с нижнего уровня на верх-

ний и обратно идут с одинаковыми скоростями. Поэтому лампа-вспышка самое большое могла бы лишь уравнивать населенности обоих уровней. Наличие же спонтанного излучения приводило бы к обеднению (атомами) верхнего уровня по сравнению с нижним.

Положение меняется благодаря наличию третьего, широкого энергетического уровня, состоящего из полос \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 . Лампа-вспышка переводит атомы хрома из невозбужденного состояния в возбужденное, т. е. в энергетические полосы \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 . Значительная ширина этих полос имеет большое практическое значение. Лампа-вспышка излучает свет, близкий к белому. Если бы уровни \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 были очень узкими, то лишь ничтожная часть энергии лампы-вспышки могла бы быть использована на их возбуждение. Благодаря же значительной ширине полос \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 на их возбуждение уходит 10—15% лучистой энергии лампы-вспышки. На уровнях \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 возбужденные атомы хрома живут очень короткое время ($\sim 10^{-8}$ с). За это время они переходят на один из уровней \mathcal{E}_2 . При таком переходе атомы хрома не излучают, а расходуют свою энергию на возбуждение колебаний кристаллической решетки. Возможность обратного возвращения атома из полос \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 на уровень \mathcal{E}_1 , хотя и существует, но вероятность такого процесса пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью перехода на уровни \mathcal{E}_2 . Уровни \mathcal{E}_2 метастабильны. Время жизни атома на них $\sim 10^{-3}$ с, что по атомным масштабам очень велико. Это позволяет накапливать атомы на уровнях \mathcal{E}_2 . Если переводить атомы с уровня \mathcal{E}_1 на уровни \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 достаточно быстро, то на уровнях \mathcal{E}_2 можно перевести больше половины атомов хрома. Тогда на уровнях \mathcal{E}_2

окажется больше атомов, чем на уровне \mathcal{E}_1 , т. е. возникнет инверсная заселенность этих уровней.

3. Подсчитаем мощность лампы-вспышки, необходимую для создания инверсной заселенности уровней \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Средняя длина волны, излучаемая при переходе из полос \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 на уровень \mathcal{E}_1 , порядка 450 нм. Поэтому для перевода одного атома хрома с уровня \mathcal{E}_1 на уровни \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 требуется в среднем энергия $h\nu = hc/\lambda \approx \approx 4,4 \cdot 10^{-12}$ эрг. В рубине, обычно употребляемом для лазеров, на каждый см^3 приходится около 10^{19} атомов хрома. Не менее половины из них надо перевести в полосы \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 . На это требуется энергия $\approx 2,2 \cdot 10^7$ эрг = 2,2 Дж. Атомы должны быть переведены на возбужденные уровни \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 за время, не превышающее времени жизни атома хрома на уровне \mathcal{E}_2 ($\sim 2 \cdot 10^{-3}$ с). В противном случае инверсная заселенность получиться не может. Таким образом, минимальная мощность, идущая на возбуждение атомов, должна быть порядка $2,2/10^{-3} = 2200$ Вт/см³ = 2,2 кВт/см³. Если коэффициент использования лучистой энергии лампы принять равным 10—15%, то потребляемая мощность лампы должна быть ~ 20 кВт/см³. Для рубинового стержня с объемом 10 см³ получится ~ 200 кВт. Это достигается сравнительно легко. Нетрудно подсчитать, что при напряжении 2000 В емкость батареи конденсаторов должна быть не меньше 100 мкФ. Обычно употребляются батареи с емкостью ~ 1000 мкФ.

Значительная доля лучистой энергии (более 50%), поглощенной рубиновым стержнем, тратится на его нагревание. Но при температурах, превышающих примерно 1000 К, рубиновый лазер перестает генерировать. Поэтому в некоторых конструкциях лазеров предусмотрено охлаждение рубина проточной водой и даже жидким азотом.

4. Рубин — *одноосный кристалл*. Обыкновенный и необыкновенный показатели преломления светло-красного рубина, употребляемого в лазерах, равны соответственно $n_o = 1,7653$ и $n_e = 1,7573$ (для $\lambda = 656$ нм). Рубиновый лазер может давать *поляризованный свет* без каких-либо специальных поляризационных приспособлений. Для этого оптическая ось рубинового стержня не должна совпадать с его геометрической осью. Возникновение линейной поляризации нельзя объяснить различием коэффициентов отражения обыкновенного и необыкновенного лучей, так как разность $n_o - n_e$ слишком мала. Поляризация возникает потому, что в обыкновенной волне направления волновой нормали и луча совпадают между собой, а в необыкновенной не совпадают. Чтобы зеркала лазера действовали эффективно, как резонатор, необходимо, чтобы волновые нормали были к ним перпендикулярны. Но тогда в рубине только обыкновенный луч будет распространяться параллельно геометрической оси стержня, а необыкновенный пойдет под углом к ней, попадая на боковую поверхность стержня. Поэтому резона-

тор будет эффективнее усиливать обыкновенные лучи, чем необыкновенные. Из лазера будут преимущественно выходить обыкновенные лучи, в которых электрический вектор перпендикулярен к оптической и геометрической осям кристалла. Если эти оси совпадают, то поляризация не возникает. Если же, как показали наблюдения, угол между ними заключен в пределах от 60° до 90° , то линейная поляризация полная.

5. Наиболее распространенным является *импульсный режим* работы рубинового лазера. Лампа-вспышка дает импульс света длительностью $\sim 10^{-8}$ с. Длительность когерентного импульса, излучаемого лазером, несколько короче. Это связано, во-первых, с тем, что требуется некоторое время, чтобы заселенность уровня \mathcal{E}_2 достигла порогового значения, после чего лазер начинает генерировать. Во-вторых, с тем, что генерация лазера прекращается, когда интенсивность вспышки лампы понижается настолько, что ее становится уже недостаточно для поддержания заселенности выше пороговой. Сам лазерный импульс имеет сложную структуру и состоит из множества отдельных импульсов длительностью до 10^{-6} с, следующих друг за другом с интервалом $\sim 3 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ с. Мощность рубинового лазера в импульсе может достигать десятков кВт при длине стержня в 20—30 см и диаметре 1,5 см.

Эта мощность может быть повышена до нескольких десятков мегаватт за счет уменьшения длительности генерируемого импульса. Для этого на уровень \mathcal{E}_2 надо перевести не половину, а большую часть атомов хрома, оставив уровень \mathcal{E}_1 практически незаполненным. Тогда при длине рубинового стержня 10—20 см импульс генерируемого света, как показывает расчет, может развиваться за время $\sim 10^{-8}$ с. Лампа-вспышка легко могла бы произвести такой переход, если бы в рубине не возникла генерация, возвращающая атомы хрома снова на исходный уровень \mathcal{E}_1 . А генерация начинается сразу же, как только заселенность уровня \mathcal{E}_2 станет выше пороговой. Задачу можно решить, если на короткое время выключить обратную связь, осуществляемую зеркалами. За это время можно перевести все атомы хрома на возбужденный уровень \mathcal{E}_2 . При выключенных зеркалах среднее время жизни атома хрома на уровне \mathcal{E}_2 составляет около 0,002 с. Если в течение этого времени на мгновение снова включить зеркала, то происходит почти мгновенный вынужденный переход атомов на невозбужденный уровень \mathcal{E}_1 и связанная с ним мощная вспышка лазерного излучения.

6. Быстрое включение и выключение обратной связи, а также вообще изменение добротности резонатора можно осуществить, заменив одно из зеркал призмой P полного отражения (рис. 348), вращающейся с угловой скоростью ~ 500 об/с. Лазер может генерировать только в положении призмы, изображенном на рис. 348, или очень близком к нему. Во всех остальных положениях обратной связи нет и лазер не генерирует. В это время происходит опти-

ческая накачка рубинового стержня R . Когда призма займет положение, указанное на рис. 348, происходит излучение мощного лазерного импульса. Хотя при этом призма и продолжает быстро вращаться, но за короткое время $\sim 10^{-8}$ с, требующееся для развития лазерного импульса, она не успевает сколько-нибудь заметно сместиться из указанного положения. После высвечивания запасенной энергии при дальнейшем вращении призмы снова начинается оптическая накачка, пока при повороте на 360° не произойдет излучение нового лазерного импульса. Однако при прохождении через стержень мощного импульса выключение призмы не всегда достаточно для прекращения действия обратной связи, так как она может сохраняться из-за отражения света от концов рубинового стержня (в случае рубина коэффициент отражения $(n-1)^2/(n+1)^2 \approx 7,6\%$). Во избежание этого концы рубинового стержня делают скошенными под углом к его геометрической оси. Обычно угол падения берут равным *углу Брюстера* (на границе рубин — воздух $\varphi_B \approx 30^\circ$). Тогда генерируется линейно поляризованный свет, электрический вектор которого лежит в плоскости падения.

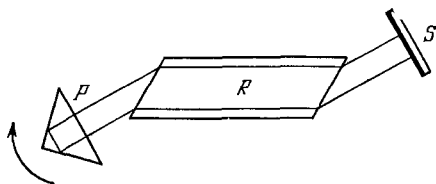


Рис. 348.

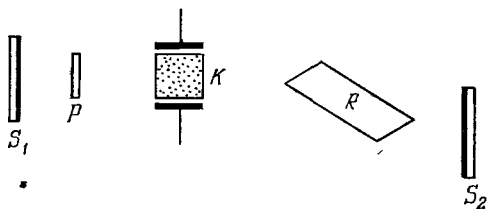


Рис. 349.

7. Более быстрое включение и выключение обратной связи производится с помощью оптического затвора — *ячейки Керра*

с нитробензолом или *ячейки Погкельса* с анизотропным кристаллом (рис. 349). Ячейка вместе со своим конденсатором повернута вокруг оси установки на угол 45° (это на рис. 349 не показано). Поляризатор P (поляризатор или поляризационная призма) ориентирован так, чтобы полностью пропускать линейно поляризованное излучение рубинового стержня, когда он генерирует. Перед включением лампы-вспышки на ячейку K подается такое напряжение, чтобы она поворачивала плоскость поляризации излучения лазера на угол 90° . Тогда свет через поляризатор P не пройдет, т. е. обратная связь будет выключена. В то время, когда лампа дает вспышку, происходит оптическая накачка рубинового стержня. Если затем быстро снять напряжение с конденсатора ячейки, то линейно поляризованное излучение рубина начнет свободно распространяться между зеркалами S_1 и S_2 и возникнет мощный им-

пульс индуцированного излучения лазера длительностью порядка 10^{-8} с.

8. Большое распространение в качестве оптических затворов получили также *просветляющиеся фильтры*, помещаемые вместо ячейки Керра или Поккельса. (Поляризатор P в этом случае не нужен.) Их действие основано на увеличении прозрачности вещества, когда интенсивность света становится достаточно большой, как это имеет место в случае излучения лазеров (см. § 89, пункт 6). При малой интенсивности света фильтр поглощает свет, почти полностью устраняя обратную связь. С увеличением заселенности верхнего уровня возникает слабая генерация рубинового стержня, несколько уменьшающая поглощение фильтра. Это приводит к усилению обратной связи и вызывает лавину лазерного излучения. Последняя по мере нарастания все более и более просветляет фильтр. Когда интенсивность излучения начнет уменьшаться, поглощение фильтра будет быстро возрастать, а обратная связь ослабляться. Поскольку вся система работает автоматически, лазер с просветляющимися фильтрами во время вспышки лампы накачки может генерировать серию импульсов, следующих друг за другом.

9. Быстрое включение обратной связи позволяет сократить длительность импульса лазерного излучения до 10^{-7} — 10^{-8} с. Так как энергия импульса, снимаемая с рубинового стержня длиной 20 см и диаметром 1,5 см, составляет 1—2 Дж, то при этом развивается мощность 10—200 МВт. Дальнейшее повышение мощности лазерного импульса может быть достигнуто путем усиления света в каскаде из нескольких последовательно расположенных лазеров. Первый лазер в таком каскаде должен служить *генератором*, остальные — *усилителями света*. Если мощность генерируемого импульса достаточно велика, то уже небольшой его части вблизи передового фронта достаточно, чтобы вызвать вынужденные переходы в невозбужденное состояние всех возбужденных атомов хрома в рубине усилителей. Это сокращает длительность импульса и повышает его мощность. Таким путем удалось получить *гигантские импульсы света* длительностью в $2 \cdot 10^{-9}$ с при полной энергии импульса ~ 20 Дж. Это соответствует мощности $\sim 10^4$ МВт. Но и такая мощность еще не предел. Лазер с просветляющимся фильтром дает импульс длительностью $\sim 10^{-8}$ с, состоящий из последовательности импульсов, длительность которых может составлять 10^{-11} — 10^{-12} с. Выделение одного такого импульса с последующим усилением его позволяет достигнуть мощности $\sim 10^7$ МВт.

10. Из других твердых материалов, употребляемых в лазерах, надо упомянуть прежде всего *неодимовое стекло* и *флюорит кальция* (CaF_2) с небольшой примесью атомов редкоземельных элементов: *диспрозия* (Dy), *самария* (Sm) и пр. Активность среды создается ионами неодима Nd^{+++} , диспрозия Dy^{++} , самария Sm^{++} и т. д. Неодимовое стекло генерирует инфракрасное излучение с длиной волны

$\lambda = 1,06$ мкм, а флюорит кальция с диспрозием — еще более длинноволновое излучение с $\lambda = 2,36$ мкм. Стержни из неодимового стекла изготовить легче, чем из рубина. Стекланные стержни могут достигать длины 0,5—1 м при диаметре до 5 см. Ширина полос у неодимового стекла больше, чем у рубина, что позволяет получить больший КПД. Зато у рубина более высокая прочность. При длительности импульса 10^{-8} — 10^{-9} с рубин выдерживает мощности $(3-4) \cdot 10^3$ МВт на каждый см^2 поперечного сечения стержня, а неодимовое стекло — только $(1-1,5) \cdot 10^3$ МВт.

В отличие от рубинового лазера, работающего по *трехуровневой* схеме, лазер на флюорите кальция с примесью диспрозия работает по *четырёхуровневой* схеме. Это позволяет создавать достаточно мощные лазеры, работающие не импульсами, а непрерывно, что для некоторых применений очень существенно. Между основным уровнем \mathcal{E}_1 диспрозия в кристалле и энергетической полосой \mathcal{E}_2 расположены два промежуточных уровня \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 (рис. 350). Между ними и создается инверсная заселенность атомов диспрозия. Лампа-вспышка переводит атомы диспрозия через широкую энергетическую полосу \mathcal{E}_2 на уровень \mathcal{E}_3 . Уровень \mathcal{E}_4 по энергии приподнят над уровнем \mathcal{E}_1 настолько высоко, что при температуре жидкого азота его заселенность N_4 практически равна нулю. Поэтому нет необходимости переводить на уровень \mathcal{E}_3 больше половины атомов диспрозия. Достаточно лишь, чтобы разность заселенностей $N_3 - N_4$ уровней \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 превысила пороговое значение. Оно составляет лишь небольшую долю атомов диспрозия. Достаточно сравнительно небольшая мощность лампы-накачки ($\approx 15-20$ Вт), чтобы осуществить непрерывную работу лазера. Кроме того, непрерывная накачка позволяет генерировать гигантские импульсы с большой частотой повторения (до нескольких кГц). Мощности света, получаемые при этом в каждом импульсе, $\approx 1-2$ МВт.

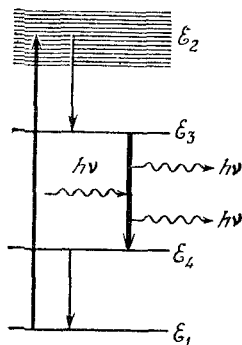


Рис. 350.

ЗАДАЧИ

1. Мощность рубинового лазера в импульсе равна $W \approx 100$ МВт. Площадь поперечного сечения рубинового стержня $S = 1$ см^2 . Оценить напряженность E электрического поля и давление света в лазерном пучке, считая его строго плоскопараллельным ($\lambda = 694,3$ нм). Как изменятся эти величины, если пучок сфокусировать идеальной линзой с фокусным расстоянием $f \approx 5$ см?

Решение. Напряженность электрического поля E_0 в несфокусированном пучке оценим по формуле

$$W = \frac{c}{4\pi} \overline{EHS} = \frac{c}{4\pi} \overline{E^2} S,$$

а давление излучения \mathcal{P}_0 — по формуле $\mathcal{P}_0 = W/(cS)$. Таким путем находим

$$E_0 \approx \sqrt{E^2} = \sqrt{\frac{4\pi W}{cS}} = 647 \text{ ГГСЭ} = 1,94 \cdot 10^8 \text{ В/см,}$$

$$\mathcal{P}_0 \approx 3,3 \cdot 10^4 \text{ дин/см}^2 \approx 0,033 \text{ атм.}$$

Для расчета соответствующих величин в фокусе можно пользоваться теми же формулами, вычислив предварительно ширину пучка. Для оценки будем считать, что весь свет концентрируется в пределах центрального светлого кружка с радиусом $R = 0,61 f\lambda/r$ и площадью

$$\pi R^2 = \pi (0,61 f\lambda/r)^2 = (0,61\pi f\lambda)^2/S,$$

где r — радиус поперечного сечения падающего пучка. Эту площадь и надо подставить в предыдущие формулы вместо S . В результате получим

$$E \approx \sqrt{E^2} \approx \frac{S}{0,61\pi f\lambda} E_0 = 1,5 \cdot 10^3 E_0 = 2,9 \cdot 10^8 \text{ В/см,}$$

$$\mathcal{P} = \left(\frac{S}{0,61\pi f\lambda}\right)^2 \mathcal{P}_0 = 2,25 \cdot 10^6 \mathcal{P}_0 \approx 7,4 \cdot 10^4 \text{ атм.}$$

Такое давление было бы, если бы пучок лазерного света фокусировался в вакууме. Если же он падает на вещество, то из-за большой концентрации энергии вблизи фокуса происходит практически мгновенное испарение вещества (с вращением его в плазму). С этим связано еще большее повышение давления.

2. Эффективной температурой $T_{\text{эф}}$ лазерного излучения называется такая температура абсолютно черного тела, при которой оно дает излучение той же удельной интенсивности I_{ν} частоты ν , что и лазер. Оценить эффективную температуру гелий-неонового лазера, генерирующего в непрерывном режиме свет с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм ($\nu \approx 5 \cdot 10^{14}$ Гц.) Ширина спектральной линии генерируемого света $\delta\nu \approx 10^4$ Гц, расходимость светового пучка $\delta\theta \approx 1' \approx 3 \cdot 10^{-4}$ рад, мощность излучения $W = 10$ мВт.

Решение. Удельная интенсивность лазерного излучения $I_{\nu} = W/(\delta\nu \cdot \delta\Omega)$, где $\delta\Omega = (\delta\theta)^2 \approx 10^{-7}$ ср — телесный угол, определяющий расходимость светового пучка. По формуле Рэлея — Джинса

$$I_{\nu} = \frac{2k\nu^2}{c^2} T_{\text{эф}}.$$

Приравнявая это предыдущему выражению, получим

$$T_{\text{эф}} \approx \frac{c^2 W}{2k\nu^2 \delta\nu \cdot \delta\Omega} \approx 10^{11} \text{ К,}$$

что примерно в 10^{11} раз превосходит температуру Солнца.

§ 122. Гелий-неоновый лазер

1. Энергетический спектр газов, во всяком случае при тех давлениях, которые применяются в рекламных трубках и лазерах, весьма точно совпадает с энергетическим спектром *изолированных атомов и молекул*, из которых состоит газ. Поэтому спектральные линии газов *более узкие*, чем линии примесей в твердых телах. Газы отличаются *высокой оптической однородностью* и *малой плотностью*, а поэтому слабо рассеивают и искажают волны, распространяющиеся в них. Все это позволяет использовать в газовых лазерах большие расстояния между зеркалами и получать *острую направ-*