

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ф.А. Губарев

**ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ И ПАРАМЕТРОВ
ГЕНЕРАЦИИ He-Ne ЛАЗЕРА**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Оптические методы в биологии и медицине» для
студентов магистратуры по направлению 12.04.04
«Биотехнические системы и технологии»*

2017

Цель работы:

Ознакомиться с принципом действия и конструкцией гелий-неонового лазера. Научиться использовать оборудование для визуального контроля микрообъектов и труднодоступных мест. Изучить технику безопасности при работе с лазерным излучением.

Предварительное задание

1. Ознакомиться с основными типами приборов для измерения мощности излучения.
2. Изучить принцип действия и способ создания инверсии в гелий-неоновом лазере.
3. Рассчитать квантовый КПД He-Ne лазера для основных линий генерации ($\lambda_1 = 632,8$ нм, $\lambda_2 = 1,15$ мкм, $\lambda_3 = 3,39$ мкм).

Техника безопасности при работе с лазерами

Лазерное излучение (прямое, отраженное либо рассеянное) при попадании в глаза и на кожный покров человека могут вызвать их повреждение. Поглощаясь биологическими тканями, излучение лазера может приводить к необратимым процессам в живом организме. В частности, энергия лазерного излучения может превратиться в тепловую энергию, вызывая ожог кожи, либо коагуляцию сосудов. Под действием мощного излучения могут обесцвечиваться волосы и разрушаться кожный покров.

Действие лазерного излучения на биологические объекты зависит от мощности светового потока, длины волны облучения, режима работы лазера. Лазеры непрерывного действия малой мощности оказывают в основном тепловое воздействие, которое приводит к фотокоагуляции. Более мощные лазерные системы (в частности CO₂, СО - лазеры способны разрезать ткани, что и используется в лазерной хирургии). Импульсные лазеры с длительностью импульса от единиц нс до единиц мс и энергией в импульсе от единиц до тысяч Дж, кроме теплового воздействия могут приводить к взрывным процессам в тканях.

Опытами на животных однозначно установлено, что лазерное излучение влияет и на нервную систему. Так при облучении головного мозга мышей сфокусированным лазерным пучком развивался паралич, и наступала смерть. Особенно опасно лазерное излучение для глаз, причем даже самых маломощных гелий-неоновых и полупроводниковых лазеров. Опытным путем на животных установлены допустимые плотности мощности и энергии (для случая импульсного воздействия) для органов зрения: при непрерывном излучении – 0,35 Вт/см², при импульсном с длительностью около 30 мкс – 0,27 Дж/см².

Простые оценки показывают, что излучение маломощного гелий-неонового лазера при попадании в глаз может нарушить сетчатку. Проведем эту оценку. Пусть мощность лазера – 1 мВт. Оптическая система глаза представляет собой подобие собирающей (фокусирующей) линзы. Поэтому, плотность мощности p лазерного излучения в фокусе линзы составляет:

$$p = (D / F \lambda)^2 P$$

где P – мощность лазера, D – диаметр линзы (в данном случае входного зрачка), F – фокусное расстояние системы (для глаза $F = 1,5$ см), λ – длина волны излучения, $\lambda = 632,8$ нм. D изменяется в зависимости от яркости облучения от 1 до 7 мм. Полагая для простоты $D = 0,1$ см, будем иметь:

$$p = (0,1 \text{ см} / 1,5 \text{ см} \times 0,00006 \text{ см})^2 \times 0,001 \text{ Вт} = 1,2 \times 10^3 \text{ Вт/см}^2,$$

что значительно превышает допустимое значение (0,35 Вт/см²). Очевидно, что существенное значение имеет диаметр зрачка, который меняется в зависимости от освещенности. Поэтому рекомендуется работать с лазерами в хорошо освещенных

помещениях, когда диаметр зрачка – минимальный. Впрочем, этому требованию при настроечных работах удовлетворить трудно – они проводятся в затемненном помещении.

Таким образом, прямое попадание в глаз излучения маломощного лазера, либо отраженного или рассеянного излучения мощного лазера опасно для обслуживающего персонала и пациентов. При больших мощностях и энергиях могут страдать, как отмечено выше, кожный и волосяной покровы, центральная нервная система.

Соответственно, необходим перечень защитных мероприятий:

1. Прежде всего, это определение предельно допустимых уровней мощностей (для непрерывных и квазинепрерывных) лазеров и энергий (для импульсных) для глаз, кожного покрова, нормального функционирования нервной системы и т.д.

2. Разработка правил охраны труда в помещениях, где работают лазерные установки (требования к помещениям).

3. Разработка правил эксплуатации лазерных установок (конкретно к используемым).

При поражении глаза лазерным излучением необходимо забинтовать пострадавший глаз и немедленно отправить пострадавшего к врачу-офтальмологу.

Принцип работы гелий-неонового лазера

Гелий-неоновый лазер является типичным представителем газовых лазеров. При накачке активной среды используется принцип резонансной передачи энергии возбуждения от примесного газа гелия к основному – неону. Генерация осуществляется на атомных переходах атомов неона. Лазер излучает на нескольких длинах волн, наиболее известная из них $\lambda = 632,8$ нм (красная). Среди других линий – две линии в ИК-диапазоне с $\lambda = 1,15$ и $3,39$ мкм, а также зеленая с длиной волны $\lambda = 543$ нм. Гелий-неоновый лазер, генерирующий на переходе с длиной волны $\lambda = 1,15$ мкм, был самым первым газовым лазером, более того, на нем впервые продемонстрирована непрерывная лазерная генерация.

Упрощенная диаграмма энергетических уровней He-Ne лазера приведена на рис. 1. Из диаграммы очевидно, что в атоме He уровни 2^3S_1 (энергия возбуждения 19,81 эВ) и 2^1S_0 (20,61 эВ) являются близкими к резонансу с состояниями $2s_2$ (19,78 эВ) и $3s_2$ (20,66 эВ) атома Ne. Поскольку уровни 2^3S_1 и 2^1S_0 являются метастабильными, атомы He в этих состояниях оказываются весьма эффективным средством для возбуждения $2s$ - и $3s$ -уровней атомов Ne посредством резонансного переноса энергии. Передача энергии от атомов гелия к атомам неона осуществляется в неупругих соударениях второго рода, т.е. таких, при которых внутренняя энергия от одной сталкивающейся частицы передается другой. Разница энергии между соответствующими уровнями компенсируется за счет тепловой энергии сталкивающихся атомов, которая составляет при комнатной температуре ($T = 300$ К) $k \cdot T = 0,026$ эВ. Было установлено, что в He-Ne лазере именно этот механизм возбуждения является доминирующим при получении инверсии населенностей, хотя накачка, помимо этого, может осуществляться и за счет столкновений электронов с атомами Ne. Поскольку $2s$ - и $3s$ -уровни атома Ne могут быть населены достаточно сильно, они хорошо подходят на роль верхних уровней лазерных переходов. В качестве возможных лазерных переходов являются переходы в p -состояния. Более того, следует отметить, что время релаксации s -состояний ($\tau_s = 100$ нс) на порядок превышает время релаксации p -состояний ($\tau_p = 10$ нс), таким образом, выполняется условие непрерывной генерации. Следует также заметить, что вероятность возбуждения из основного состояния на уровни $2p$ и $3p$ (за счет электронного удара), вследствие меньших сечений взаимодействия, оказывается значительно меньше, чем соответствующие вероятности возбуждения на уровни $2s$ и $3s$. Тем не менее, прямое возбуждение на уровни $2p$ и $3p$ также оказывает значительное влияние на работу лазера.

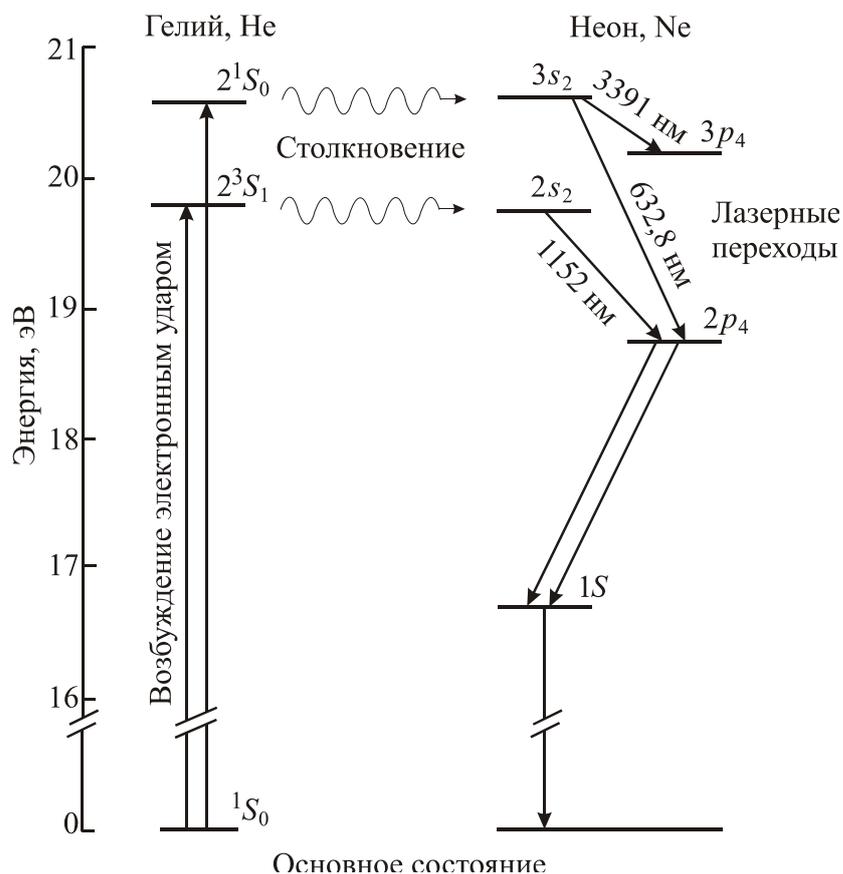


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней He-Ne лазера

Из сказанного выше следует, что генерацию в неоне можно ожидать между 3s- или 2s-уровнями (играющими роль верхних лазерных уровней) и 2p- или 3p-уровнями, которые можно рассматривать как нижние лазерные уровни. Для переходов с сильно отличающимися длинами волн ($\Delta\lambda > 0,2\lambda$) каждый конкретный переход, на котором будет осуществляться генерация, определяется той длиной волны, на которую «настроен» максимум коэффициента отражения многослойного диэлектрического зеркала (резонатора). Лазерные переходы уширены преимущественно благодаря эффекту Доплера. Так, например, для красного He-Ne-перехода ($\lambda = 633$ нм в вакууме и $\lambda = 632,8$ нм в воздухе) доплеровское уширение приводит к тому, что ширина этой линии составляет порядка $\sim 1,5$ ГГц. Для сравнения можно оценить величину собственного уширения:

$$\Delta\nu_{\text{nat}} = 1/(2\pi\tau) = 19 \text{ МГц}, \text{ где } \tau^{-1} = \tau_s^{-1} + \tau_p^{-1}.$$

Уширение, связанное со столкновительными процессами, оказывается еще меньше собственного уширения (например, для чистого Ne имеем $\Delta\nu_c = 0,6$ МГц при давлении $p = 0,5$ мм рт. ст.).

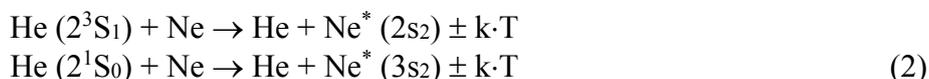
Возбуждение газовой среды осуществляется обычно стационарным слаботоковым тлеющим разрядом. Плотность тока разряда составляет $100\text{--}200$ мА/см². В соударениях атомов гелия (в основном состоянии) с электронами плазмы тлеющего разряда создаются возбужденные атомы гелия:



здесь звездочкой отмечен возбужденный атом гелия, а δE - энергия, теряемая «быстрым» электроном плазмы при столкновении (около 20 эВ, в нашем случае). Процессы, протекающие по схеме (1), принято называть столкновениями первого рода, т.е. такими,

при которых кинетическая энергия одной частицы (в данном случае электрона) переходит во внутреннюю энергию другой (атома гелия).

Часть из созданных в реакции (1) возбужденных атомов в неупругих соударениях с атомами гелия, находящимися в основном состоянии, и электронами, окажется в состояниях 2^3S_1 и 2^1S_0 . Поскольку состояния 2^3S_1 и 2^1S_0 являются долгоживущими по сравнению с излучающими состояниями, основную массу возбужденных атомов гелия в разряде составляют именно эти атомы. В неупругих столкновениях второго рода по схеме



осуществляется непосредственно накачка верхних рабочих состояний неона.

Непосредственное возбуждение уровней неона из основного состояния «быстрыми» электронами ударами первого рода нежелательно, так как будут заселяться и нижние рабочие состояния $2p_4$ и $3p_4$, что приведет к срыву инверсии. Чтобы избежать этого, концентрация атомов неона берется на порядок меньше, чем концентрация атомов гелия.

Таким образом, использование буферного газа гелия позволяет осуществлять селективную накачку $2s_2$ и $3s_2$ состояний неона. Время жизни атомов в этих состояниях составляет, как отмечалось выше, на порядок больше, чем время жизни в состояниях $2p_4$ и $3p_4$, поэтому между парами $3s_2 - 2p_4$ (длина волны излучения 632,8 нм), $2s_2 - 2p_4$ (1152 нм), $3s_2 - 3p_4$ (3391 нм) образуется инверсия и возникает индуцированное излучение. Уровни $2p_4$ и $3p_4$ неона спонтанно разрушаются (очищаются) на блок метастабильных уровней $1s$. Последние уходят из разряда вследствие диффузии к стенке. Естественно этот процесс более эффективен в узких разрядных трубках, поэтому рабочие диаметры трубок составляют единицы миллиметров. Длина же трубок составляет несколько десятков сантиметров, вплоть до 1–2 м, поскольку коэффициент усиления мал. Типичные параметры гелий-неоновых лазеров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Типичные параметры гелий-неоновых лазеров

Давление газа	около 1 мм рт. ст.
Соотношение парциальных давлений гелия и неона	около 10/1
Диаметр трубки	2–8 мм
Длина трубки	20–200 см
Напряжение горения разряда	1–4 кВ
Разрядный ток	10–50 мА
Длины волн излучения	0,63; 1,15; 3,39 мкм
Излучаемая мощность	единицы - сотни мВт
Ширина линии	1,5; 2,7; 8,0 ГГц
Расходимость излучения	0,5–1 мрад
Потребляемая мощность	десятки – сотни Вт
Ресурс	тысячи часов

Наличие оптимума по диаметру обусловлено конкуренцией двух факторов. С одной стороны, при увеличении поперечного сечения активной среды лазера при прочих равных условиях происходит увеличение выходной мощности. С другой стороны, уменьшение диаметра капилляра газоразрядной трубки увеличивает коэффициент усиления пропорционально $1/D$. Последнее происходит как из-за увеличения вероятности распада на стенке капилляра метастабильного состояния неона $1s$, так и из-за увеличения количества возбужденного гелия (и тем самым неона), а значит, и коэффициента усиления

при сохранении постоянным произведения $r \cdot D$, т.е. при выполнении условия подобия тлеющих разрядов при изменении диаметра газоразрядной трубки.

Наличие оптимальной плотности тока разряда обусловлено возникновением при больших токах ступенчатых процессов типа



приводящих к уменьшению инверсии. Кроме того при высоких плотностях тока дезактивация метастабильных состояний (2^3S_1 и 2^1S_0) атома Ne происходит не только за счет столкновений со стенками, но и при сверхупругих столкновениях типа (рассмотрим на примере уровня 2^1S_0):



Поскольку скорость этого процесса пропорциональна плотности электронов N_e , а следовательно и плотности тока J , полную скорость дезактивации можно записать в виде $k_2 + k_3J$. В этом выражении k_2 является константой, характеризующей дезактивацию вследствие столкновений со стенками, а k_3J (где k_3 также константа) представляет собой скорость процессов, связанных со сверхупругими столкновениями (4). С другой стороны, скорость возбуждения можно записать как k_1J , где k_1 также константа. В стационарных условиях $N_0k_1J = (k_2 + k_3J)N^*$, где N_0 – населенность основного состояния атома Ne, а N^* – населенность возбужденного состояния 2^1S_0 . Равновесное значение населенности уровня 2^1S_0 задается выражением:

$$N^* = N_0 \frac{k_1J}{k_2 + k_3J}, \quad (5)$$

из которого видно, что при высокой плотности тока возникает насыщение населенности. Поскольку равновесная населенность $3s_2$ состояния атома Ne определяется резонансным переносом энергии из 2^1S_0 состояния Ne, населенность верхнего лазерного уровня $3s_2$ будет также насыщаться с ростом плотности тока J . С другой стороны, экспериментально обнаружено, что при отсутствии генерации населенность нижнего лазерного уровня ($2p_4$ или $3p_4$) продолжает линейно расти с увеличением J (рис. 2) вследствие непосредственной накачки атомов Ne из основного состояния и каскадных излучательных переходов с верхних лазерных уровней. Таким образом, по мере увеличения плотности тока разряда, разность населенностей, а с ней и выходная мощность, растет до некоторого оптимального значения, а затем уменьшается.



Рис. 2. Схематические зависимости населенностей верхнего и нижнего уровней He-Ne лазера от плотности тока разряда

Гелий-неоновые лазеры, как правило, имеют блочную конструкцию и состоят из блока питания и непосредственно излучателя, в котором находится стеклянная газоразрядная трубка (ГРТ), размещенная в резонаторе, образованном одним «глухим» и

одним частично пропускающим зеркалами. Зеркала имеют диэлектрическое многослойное покрытие с максимумом отражения на одной (или нескольких) длинах волн. Радиусы кривизны зеркал подбираются так, чтобы при заданном расстоянии между зеркалами образовывался устойчивый оптический резонатор. Зеркала резонатора крепятся в специальных головках, механизм которых позволяет юстировать резонатор с необходимой точностью. Головки могут располагаться на общем жестком основании или сочленяться с каркасом корпуса лазера. В последних конструкциях используются, так называемые «внутренние» зеркала, которые одновременно служат и выходными окнами разрядной трубки. Такие конструкции не требуют дополнительной настройки резонатора (юстировки).

Для уменьшения потерь при выводе излучения торцы ГРТ располагают под углом Брюстера к оптической оси резонатора. В случае внутренних зеркал окно Брюстера помещается непосредственно вовнутрь ГРТ. С какой целью применяют окна Брюстера?

Как известно, коэффициент отражения от поверхности, разделяющей две среды с различным показателем преломления, зависит от угла падения, относительного показателя преломления и типа поляризации падающего излучения. При нормальном падении потери колеблются в пределах 7–13 % и значительно превышают усиление в активной среде He-Ne лазера на длине волны 0,63 мкм; следовательно, условие самовозбуждения не выполняется и лазерная генерация невозможна.

При наклонном падении излучения коэффициент отражения существенно зависит от ориентации его плоскости поляризации. В случае совпадения плоскости поляризации падающего излучения с плоскостью падения, когда угол падения равен углу Брюстера, коэффициент отражения становится равным нулю. Для определения угла Брюстера можно воспользоваться простым соотношением: $\text{tg}\alpha_{\text{Бр}} = n$ где n – относительный показатель преломления. В частности, для границы раздела стекло-воздух $n = 1,5\text{--}1,6$ и $\alpha_{\text{Бр}} = 56\text{--}58^\circ$. Именно под таким углом к оптической оси трубки надо расположить торцевую пластинку, чтобы свести потери на отражение к минимуму. При этом излучение на выходе становится линейно поляризованным.

Характерными значениями мощности излучения гелий-неоновых лазеров следует считать десятки милливольт в областях 0,63 и 1,15 мкм и сотни в области 3,39 мкм. Срок службы лазеров при отсутствии ошибок в изготовлении ограничивается процессами в разряде и исчисляется годами. Обычно производитель гарантирует минимальную наработку ~10000 часов. С течением времени в разряде происходит нарушение состава газа. Из-за сорбции атомов в стенках и электродах происходит процесс «жестчения», падает давление, меняется отношение парциальных давлений He и Ne. Поэтому мощность излучения постепенно уменьшается.

КПД He-Ne лазера на всех лазерных переходах очень низкий ($<10^{-3}$). Главной причиной столь низкого КПД является малая величина квантовой эффективности лазера. Действительно, каждый элементарный процесс накачки требует затраты энергии около 20 эВ, в то время как энергия лазерного фотона не превышает 2 эВ. С другой стороны, наличие очень узкой линии усиления в таком лазере является очевидным преимуществом при получении генерации в одномодовом режиме. Если длина резонатора достаточно мала ($< 15\text{--}20$ см), генерацию на одной продольной моде можно реализовать путем тонкой подстройки длины резонатора (например, с помощью пьезокерамического устройства), добиваясь, таким образом, совпадения частоты моды с центром контура усиления. В одномодовом He-Ne лазере можно обеспечить очень высокую степень стабилизации частоты $\Delta\nu/\nu = 10^{-11} - 10^{-12}$.

Генерирующие на красном переходе He-Ne лазеры до сих пор находят широкое применение во многих областях, где требуется маломощное когерентное излучение видимого диапазона (например, для юстировки приборов или при считывании штрих-кодов). В супермаркетах используют красные He-Ne лазеры для считывания информации, содержащейся в штрих-коде каждого продукта. Однако здесь основную конкуренцию He-

Не лазерам оказывают полупроводниковые лазеры, излучающие в красном диапазоне, которые оказываются более компактными и более эффективными. Тем не менее, He-Ne лазеры зеленого диапазона, благодаря тому, что зеленый свет намного лучше воспринимается глазом, все в большей степени используются при юстировке приборов, а также в клеточной цитометрии. Кроме того, одночастотные He-Ne лазеры часто используются в метрологических приложениях (например, в высокоточных интерференционных устройствах измерения расстояний) и в голографии. В медицине He-Ne лазеры применяются для низкоинтенсивной лазерной терапии.

Основным производителем He-Ne лазеров в России является ОАО НИИ ГРП «Плазма», г. Рязань. В настоящее время коммерчески доступны He-Ne лазеры, излучающие на длине волны 0,63 мкм, со средней мощностью генерации от 0,5 до 8 мВт с типичной расходимостью излучения 1,2–4,3 мрад. Для выполнения данной лабораторной работы предлагается использовать лазер с мощностью излучения 3 мВт с общепромышленным источником питания.

Поскольку мощность излучения лазера невысокая, для её измерения могут использоваться фотоприемники, как теплового действия, так и на основе фотодиодов.

Программа работы

1. Ознакомиться с принципом действия и функциональным назначением измерителей мощности излучения ИМО-2 и Ophir PD-300 с дисплеем.
2. Изучить конструкцию, принцип и режим работы гелий-неонового лазера (на примере лазеров ГН-3-1 и ГН-5-1).
3. Визуально определить длину волны излучения.
4. Измерить выходную мощность излучения лазера (с использованием приемников ИМО-2 и Ophir PD-300).
5. Оценить полный КПД лазера, если потребляемая от сети мощность составляет 15 Вт.
6. Высказать свои соображения о степени опасности работы с лазерным излучением.
7. С помощью собирающей линзы провести измерение мощности излучения лампы накаливания (измерения проводятся с использованием ИМО-2).
8. Пояснить отличие лазеров от источников спонтанного излучения.

Контрольные вопросы

1. Поясните условия существования непрерывной генерации.
2. Каков КПД He-Ne лазера, и какими факторами он определяется?
3. На какой длине волны, 0,63 или 3,39 мкм КПД лазера выше?
4. Какова длина волны излучения и чем она обусловлена?
5. Как осуществляется накачка верхнего рабочего уровня?
6. Как осуществляется тушение нижнего рабочего уровня?
7. Чем обусловлен диаметр газоразрядной трубки лазера? Что произойдет, если сделать диаметр больше/меньше?
8. Чем обусловлена длина ГРТ? Что произойдет, если сделать её больше/меньше?
9. Соотношение парциальных давлений газов в рабочей среде лазера?
10. Какие длины волн можно получить от He-Ne лазера?
11. Какой тип разряда используется в He-Ne лазере? Каковы его электрические параметры?
12. Чем обусловлено ограничение на плотность тока разряда?
13. Какие конструкционные элементы содержит современный He-Ne лазер?
14. На какой длине волны, 0,63, 1,15 или 3,39 мкм выше коэффициент усиления лазера?
15. Запишите условие существования стоячих волн.
16. Назовите основные меры безопасности при работе с лазерным излучением.