

**Казанский Государственный Технический Уни-  
верситет имени А.Н.Туполева**

**Кафедра радиоэлектронных и квантовых устройств**

**РУКОВОДСТВО**

**к лабораторной работе №501 "Гелий - неоновый лазер"**

Составил: ассистент кафедры  
к.т.н. Н.Н. Русяев

Проверил: зав.кафедрой д.т.н. Г.И. Ильин

**Казань 2010**

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить принцип действия гелий-неонового лазера, механизм создания инверсной населенности, условия получения непрерывной генерации,
2. Исследовать зависимость усиления активного элемента и выходной мощности лазера от тока разряда.

## ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ:

1. изучить материал теоретической <sup>5</sup> части работы;
2. выполнить предварительное задание;
3. ответить на контрольные вопросы.

В процессе выполнения п.1 рекомендуется прочесть разделы:

1. 4.5. (стр. 169-177) в кн. Ищенко Е.Ф., Климков Ю.М. Оптические квантовые генераторы. М., Сов. Радио, 1968г.
2. 2.5.1 (стр. 87-91) в кн. Пахомов ИИ., Рожков О.В., Рождествин В.Н. Оптико-электронные приборы. —М., Радио и связь. 1982г.
3. 2.2. (стр. 67-82) в кн. Рябов С.Г., Торопкин ГЛ., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники. М-, Радио и связь, 1985г.
4. Воронов В.И. Квантовая и оптическая электроника, - Казань, КГТУ им. А.Н.Туполева, 1990г.

5. Пихтин А.Н. Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства. 2-е изд. , 2002г.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Механизм создания инверсной населенности.

Необходимое для получения когерентного излучения состояние инверсной населенности в гелий-неоновом лазере создается для атомов неона, за счет многоступенчатой передачи энергии. В отдельных актах передачи участвуют свободные электроны, атомы гелия и неона, а источником энергии для них является электрическое поле, питающее разряд. Оно, ускоряя электроны, сообщает им кинетическую энергию. Электроны соударяются с атомами упруго или неупруго. В последнем случае часть кинетической энергии соударяющихся частиц идет на возбуждение внутренних степеней свободы атомов, и они переходят на более высокий уровень. Участок спектра энергетических уровней атомов гелия и неона, существенный для механизма создания инверсной населенности, показан на рис. 1.

В спектре гелия показаны (рис. 1) три состояния: основное  $^1S_0$  возбужденные  $2^1S_1$ , и  $2^3S_1$ . Время жизни основного состояния неограничено, а возбужденные состояния нестабильны, их время жизни составляет  $10^{-3}$  сек. В спектре неона кроме основного состояния  $^1S_0$  показано (рис.1) три группы  $S$  состояний :  $1s$ ,  $2s_2$ ,  $3s_2$ , и две группы  $P$  состояний  $2p$ ,  $3p$ .

Группы  $S$  уровней состоят из четырех подуровней, а группы  $P$  уровней - из десяти. Время жизни  $S$  уровней ( $10^{-7}$  сек) на порядок превышает время жизни  $P$  уровней ( $10^{-8}$  сек), поэтому при заселении  $s$  состояний, лежащих по шкале энергий выше  $p$  состояний легко возникает ин-

версная населенность  $s$  уровней относительно ниже лежащих  $p$  уровней. Числовые данные о временах жизни и положении уровней на шкале энергии сведены в таблички на рис.1. Здесь же на рис.1 изображены непрерывными стрелками изменения состояния атомов в процессе создания инверсной населенности, а штриховыми, стрелками показаны переходы, уменьшающие инверсную населенность. Символами у стрелок отмечены причины переходов.

## 5

### ЦИКЛ НАКАЧКИ

Замкнутый цикл создания инверсной населенности целесообразно начать рассматривать с состояния наименьшего возбуждения частиц: электроны движутся с малой скоростью, атомы гелия и неона находятся в основном состоянии.

1. Ускорение электронов электрическим полем сообщает им кинетическую энергию, достаточную для возбуждения атомов гелия и неона.

2. Возбуждение атомов гелия, т.е. переход из основного состояния в возбужденное под действием ударов быстро летящих электронов. Большое время жизни возбужденных состояний  $2^3S1$  и  $2^1S1$  ведет к накоплению большого числа возбужденных атомов гелия.

3. Резонансная передача энергии от возбужденных атомов гелия к невозбужденным атомам неона при столкновении атомов гелия и неона; резонанс обусловлен тем, что энергии состояний  $2^3S1$  и  $2^1S0$  гелия незначительно (менее чем на КТ) отличаются от энергии состо-

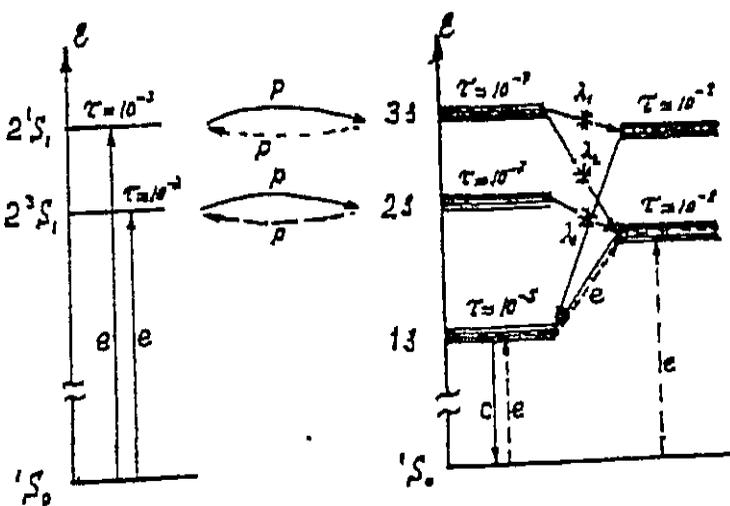
яний  $2s_2$  и  $3s_2$ , соответственно, неона. Обратная передача от возбужденных атомов неона к невозбужденным атомам гелия возможна, но ее влияние ослаблено тем, что гелия берется в 5-10 раз больше чем неона

На переходах из состояний  $2s_2$  и  $3s_2$  в состояния  $2p$  и  $3p$  возникает инверсная населенность, так как нижние уровни очищаются быстрее верхних; соответствующие длины волн показаны на рис.1.

4. Из состояний  $2p$  и  $3p$  атомы неона переходят в состояния  $1s$ , которые являются метастабильными; накопление атомов неона в  $1s$  состоянии нежелательно, так как снижает скорость накачки.

5. Возбужденные атомы неона в состоянии  $1s$  диффундируют, достигают стенки разрядной трубки и, сталкиваясь с ней, передают ей энергию возбуждения. На этом цикл накачки заканчивается.

Энергетические уровни атомов He и Ne.



## Обозначения

————— > переходы цикла накачки

----- переходы, снижающие инверсную населенность

e - возбуждение атома столкновением с электронами

p — резонансная передача энергии от одного атома к другому

c - дезактивация атома при столкновении со стенкой

\* - лазерный излучательный переход

E – энергия, запасённая атомом

**5**

$\tau$  - время жизни уровня (в секундах, ориентировочно)

$\lambda_1=3,39\text{мкм}$

$\lambda_2=0,63\text{мкм}$

$\lambda_3=1,15\text{ мкм}$

Термы Ne и их энергия (ЭВ).

Термы Ne и их энергия (ЭВ)

$2^3S1$	$1S2... 1S5$	16,619-16,948
9,818"		
$2^1S1$	$2p1... 2p1$	18,381-18966
0,614		
	$1S2... 2S9$	19,644-19,779
	$3p1... 3p10$	20,149-20,386
	$3S2... 3S5$	20,560-20-662

Состояние  $^1S0$  основное, его энергия взята за 0 (начало отсчета)

Плотность инверсной населенности зависит от концентрации частиц и скорости накачки. Наилучшие результаты получены для смеси гелия с неоном в пропорциях 5 :1 (для переходов с уровня  $3S_2$ ) и 10:1 (для перехода с уровня  $2S_2$ ) при давлениях в единицы тор (мм.рт.ст.) и токах разряда от единиц до десятков миллиампер. Гелия требуется больше чем неона, так как в атомах гелия происходит относительно медленное накопление энергии возбуждения, а 5 атомы неона относительно быстро получают энергию от атомов гелия и отдают ее полю резонатора, таким образом, один атом неона успевает "обслуживать" от 5 до 10 атомов гелия. Величина оптимального давления определяется внутренним диаметром  $d$  разрядной трубки, поскольку этим диаметром определена скорость опустошения нижних лазерных уровней. Экспериментально установлено, что для перехода  $3S_2 \rightarrow 2p_4$  ( $\lambda = 0,63$  мкм) оптимальное давление  $P_{\text{opt}} = 400/d$ , где  $d$  в мм.,  $p$  в Па.

## II. ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Инверсная населенность уровней  $2s_2$  и  $3s_2$ , относительно уровней  $2p$  и  $3p$ , обеспечивает усиление света за счет механизма стимулированного излучения. Усиление описывается законом Бугера с положительным показателем  $\alpha$ .

$$J(l) = J(0) \times \exp(\alpha l),$$

где  $J(l)$  интенсивность света на расстояния  $l$  от входа в активную среду. Показатель  $\alpha$  зависит от частоты. Он положителен на частотах, соответствующих длинам волн 3,39 мкм, 1,15 мкм и 0,63 мкм в пределах полос 40 МГц, 600 МГц и 1500 МГц, соответственно.

Выбор одной из этих полос для генерации когерентного излучения осуществляется за счет избирательности коэффициента отражения диэлектрических зеркал. Одно из зеркал делают обычно сферическим вогнутым с большим коэффициентом отражения. Это зеркало называют глухим, т.е. не пропускающим свет. Второе зеркало, как правило, ставят плоское и частично прозрачное. Его называют выходным, так как через него выходит генерируемый лазером луч света.

### III. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ.

Зависимость мощности излучения гелий-неонового лазера от диаметра разрядной трубки  $d$  имеет четко выраженный максимум (рис.2)  $d_{\text{опт}}$ .

Увеличение диаметра при малых его значениях ведет к увеличению выходной мощности лазера за счет увеличения объема активной среды. Дальнейшее увеличение диаметра вблизи и сверх  $d_{\text{опт}}$  ведет к существенному увеличению времени диффузии метастабильных атомов неона в состоянии  $1s$  к стенкам разрядной трубки. Поэтому атомы неона из приосевой области перестают участвовать в цикле накачки, так как остаются в состоянии  $1s$ .

Зависимость мощности излучения гелий-неонового лазера от тока разряда тоже имеет максимум (рис.3.), при токах меньше экспериментального  $p$  увеличения тока разряда ведет к увеличению мощности излучения за счет роста скорости заселения верхних генерационных уровней. Однако при дальнейшем увеличении тока разряда быстро нарастает скорость заселения нижних генерационных уровней за счет соударения атомов неона с электронами. В результате снижается инверсная населенность, соответственно падает выходная мощность лазера и коэффициент усиления активной среды.

#### IV. СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

Основан на внесении в резонатор лазера (рис. 4) контролируемых потерь с помощью наклонной плоскопараллельной пластины I. Проследив за изменением интенсивности светового пучка при его движении по замкнутому кольцу обратной связи между зеркалами (2, рис. 4) резонатора, получим соотношение

$$J' = J \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \exp(\alpha \cdot 2 \cdot l) \cdot s, \quad (1)$$

где  $J$  интенсивность светового пучка в начале петли обратной связи,  $J'$  - та же величина после обхода петли обратной связи,  $r_1$  и  $r_2$  коэффициенты отражения I и 2 зеркала, соответственно,  $s$  - коэффициент пропускания наклонной пластинки.

Величина  $s$  зависит от направления поляризации излучения и угла наклона пластинки  $\gamma$  к оси резонатора. Потери на отражение от поверхностей пластинки  $\Gamma_n$  минимальны для излучения поляризованного в плоскости падения и составляют

$$r_n = [\operatorname{tg}^2(\gamma - \varphi)] / [\operatorname{tg}^2(\gamma + \varphi)] \quad (2), \quad 5$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} (1/n \sin \gamma) \quad (3)$$

угол преломления. Обходя кольцо обратной связи излучение дважды проходит через пластинку, т.е. четыре раза испытывает отражение поэтому коэффициент пропускания наклонной пластины, установленной в резонаторе составляет

$$s = (1 - r_n)^4 \quad (4)$$

Если пластина наклонена под углом Брюстера

$$\gamma_0 = \operatorname{arctg} n, \quad (5)$$

то,  $s = 1$ , так как  $\Gamma_n = 0$ . Изменяя наклон пластинки в обе стороны от угла Брюстера, мы вносим в резонатор потери. В момент срыва генерации потери равны усилению. Замерив углы, при которых срывается генерация лазера  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  можем рассчитывать соответствующие им коэффици-

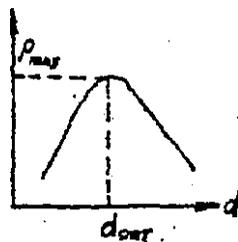


Рис. 2..

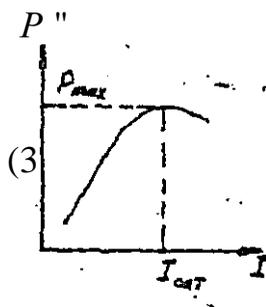


Рис. 3,

енты пропускания  $s_1$  и  $s_2$ . (Теоретически они должны равняться друг другу, но экспериментальные величины могут не совпадать; объясните возможные причины несовпадения значений  $s_1$  и  $s_2$ ).

Потери света определены произведением  $r_1 \cdot r_2 \cdot s$ , а усиление - экспонентой  $\exp(2l\alpha)$ , где  $l$  - длина оптической активной области разряда,  $\alpha$  - показатель усиления.

В момент срыва генерации имеем

$$\exp(2l\alpha_{1,2}) r_1 \cdot r_2 \cdot s_1 \text{ или } r_1 \cdot r_2 \cdot s_2 \quad (6)$$

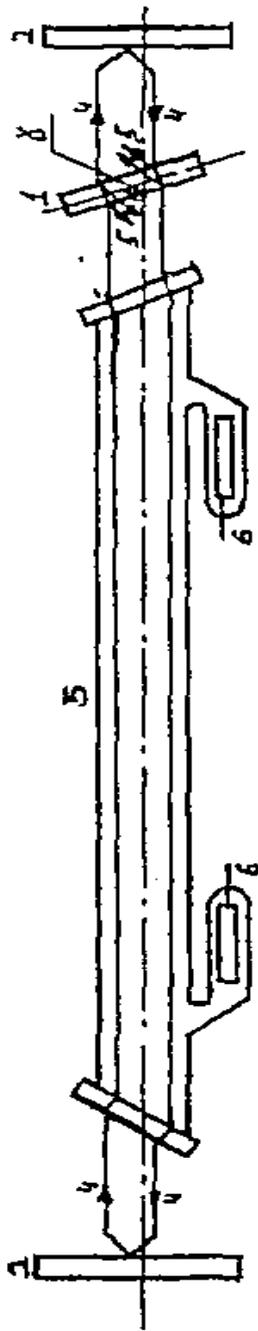
откуда определяется коэффициент усиления активного элемента

$$K_{1,2} = r_1 \cdot r_2 \cdot s_{1,2} \quad (7)$$

и показатель усиления активной среды

$$\alpha_{1,2} = (1/2l) \times \ln(r_1 \cdot r_2 \cdot s_{1,2}) \quad (8)$$

Оптическая схема установки



1. Наклонная плоскопараллельная пластина
2. Зеркало резонатора
3. Газоразрядная трубка
4. Условное изображение кольца обратной связи, создаваемое за счет отражения от зеркала резонатора
5. Лучи, отраженный от плоских поверхностей наклонной плоскопараллельной пластины
6. Электроды для подключения газоразрядной трубки к цепи электропитания разряда.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Вычислить значение угла Брюстера  $\gamma_б$  для материала с показателем преломления  $n = 1,457$ .
2. Рассчитать зависимость коэффициента пропускания  $s$  плоскопараллельной наклонной пластины, установленной в резонаторе, от угла наклона  $\gamma$  в пределах  $(\gamma_б - 15^\circ) / (\gamma_б + 15^\circ)$ , где  $\gamma_б$  - угол Брюстера, вычисленный в п. 1.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание установки. Лабораторная установка собрана на основе одного из промышленных гелий-неоновых лазеров (ЛГ-52, ЛГ-75 и т.д.) по оптической схеме (рис. 4.). В резонатор лазера введена плоскопараллельная пластина с механизмом установки и отсчета угла наклона пластины к оптической оси резонатора. В цепи питания разрядной трубки включен миллиамперметр для измерения тока разряда. На пути лазерного луча установлен измеритель мощности излучения лазера на основе ФЭУ или фотодиода. Размещение указанных элементов на конкретном варианте исполнения лабораторной установки уточните у лаборанта или преподавателя.

## ОСНОВНОЕ ЗАДАНИЕ.

Измерить зависимости от значений тока разряда: величины выходной мощности гелий-неонового лазера, коэффициента и показателя усиления его активной среды. Результаты измерений должны содержать таблицу измеренных величин и графики указанных зависимостей.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определить угол Брюстера по максимуму выходной мощности и вычислить показатель преломления материала пластинки.

2. Определить ток разряда  $I_{\text{опт}}$  при котором выходная мощность лазера максимальна. Записать  $I_{\text{опт}}$  соответствующее показанию измерителя светового потока или мощности излучения лазера..

3. Установить ток разряда 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 оптимального тока  $I_{\text{опт}}$  (из п. 2. ~~5~~ разряда, определить выходную мощность лазера (при этом пластинка устанавливается под углом Брюстера) определить коэффициент усиления активного элемента и рассчитать показатель усиления активной среды по  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , используя формулы (6) - (8) и рассчитанный график (п. 2 предварительного задания), учитывая что  $r_1 = 0,998$ ;  $r_2 = 0,99$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте график зависимости выходной мощности гелий-неонового лазера от диаметра разрядной трубки, объясните причины роста и спада мощности при изменении диаметра,

2. Нарисуйте график зависимости выходной мощности гелий-неонового лазера от тока разряда, объясните причины роста и спада выходной мощности при изменении тока разряда.

3. Нарисуйте зависимость потерь, вносимых в резонатор плоскопараллельной пластиной в зависимости от угла наклона пластинки к оси резонатора. Объясните назначение окон Брюстера.

4. Нарисуйте спектр энергетических уровней атомов гелия и неона, покажите переходы, составляющие цикл накачки.

5. Перечислите условия, необходимые и достаточные для получения инверсной населенности в активной среде гелий-неонового лазера.

6. Объясните принцип измерения коэффициента и показателя усиления с помощью наклонной плоскопараллельной пластины.

