

Р.Дж. Касумова

# ЗАДАЧИ ПО ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ



Баку -2019

**Р.Дж. Касумова**

**ЗАДАЧИ  
ПО ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

**Баку -2019**

**Научный редактор:** *М.Р. Раджабов*  
кандидат физико-математических  
наук, доцент

**Рецензенты:** *Ф.А. Рустамов,*  
доктор физико-математических  
наук, профессор,

*З.Я. Садыгов,*  
доктор наук по физике

**Р.Дж. Касумова**

**Задачи по лазерной физике** (Учебное пособие для  
высших учебных заведений). Баку, “Издательство Бакинского  
университета”, 2019, -80 стр., 37 рисунков, 1 таблица.

В книге собраны задачи по квантовой электронике, по основным принципам функционирования квантовых приборов оптического диапазона. Рассмотрены основные процессы формирования и преобразования когерентного излучения, взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, оптические явления в газах и твердых телах, методы и принципы работы приборов квантовой электроники. Кроме того в книге уделено место условиям усиления и генерации в газовых и твердотельных лазерах, работающих в непрерывном и импульсном режимах, изменению гауссова профиля лазерного пучка в пространстве. Особое внимание отведено анализу и оценке параметров лазерного излучения.

Книга, посвященная решению задач по лазерной физике, требует базовых знаний по оптике, электродинамике, квантовой электронике и лазерной физике. Пособие может быть использовано при подготовке к решению задач по газовым и твердотельным лазерам, при организации самостоятельной работы студентов в этой области.

Данная книга предназначена для студентов бакалавриата и магистратуры естественных факультетов университетов, а также технических вузов, специализирующихся в этой области, она будет полезна для докторантов и диссертантов вузов соответствующих специальностей. Кроме того книга представляет интерес для инженеров и специалистов народного хозяйства широкого профиля, использующих в своей деятельности лазеры.

**DOI: <https://doi.org/10.36719/0846/2025>**

© Р.Дж. Касумова 2019

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Данное пособие посредством решения задач знакомит студентов с принципом работы лазеров и формирует у них представления о влиянии лазерного излучения на различные материалы, в частности, на их поверхности.

Как известно, решение задач составляет важный раздел в процессе обучения точным наукам. Для решения задач требуется знание основных законов физики, понимание формул, навыки их запоминания, способность выдвигать гипотезы о характерных особенностях физических явлений и областях их применений, умение использовать общие законы применительно к решению конкретных практических задач. Умение решать задачи будет самым хорошим мерилom глубины изучения материала пособия и его восприятия.

В книге задачи систематизированы следующим образом: начиная с основных принципов работы лазеров до работы разных типов лазеров в непрерывном и импульсном режимах, режиме модулированной добротности и синхронизации мод. Уделено внимание подробному рассмотрению основных элементов лазера (активная среда, зеркала открытого резонатора), ряд задач посвящено различным типам оптического резонатора. Рассмотрены области применения лазеров в различных областях науки и техники – представлено много задач по лазерным технологиям - эффектам, возникающим при воздействии мощного когерентного излучения на материал.

# **I АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ЛАЗЕРОВ.**

## **УСИЛЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ**

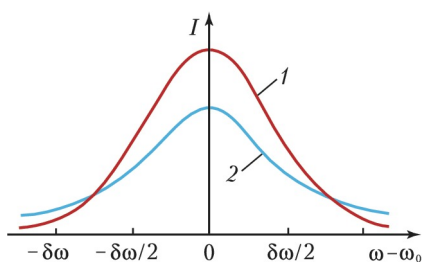
1. Из каких диапазонов состоит спектр электромагнитного излучения? Назвать каждый из этих диапазонов и указать его границы.

2. Определите размерность интегральных коэффициентов Эйнштейна для спонтанного и вынужденного излучений.

3. Спектральная линия атомного перехода однородно уширена. Ширина линии, измеренная по уровню половины максимального значения ее интенсивности, равна 200 ГГц. Найти ее ширину, измеренную по уровню  $1/e^2$  от максимального значения ее интенсивности.

4. Спектральная линия атомного перехода имеет доплеровское уширение. Ширина линии, измеренная

по уровню половины максимального значения ее интенсивности, равна 1500 МГц. Найти ее ширину, измеренную по уровню  $1/e^2$  от максимального значения ее интенсивности.



Гауссовский контур спектральной линии (1), лоренцевский контур (2):  $\omega_0$  — центральная частота, соответствующая максимальной интенсивности излучения.

**5.** Найти температуру рабочего перехода неодимового лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм), если населенность его верхнего уровня в 2 раза превышает населенность его нижнего уровня. Вырождение уровней считать равным ( $g_1 = g_2$ ).

6. Чему равно естественное уширение уровня энергии атома, если время жизни равно  $10^{-8}$  с?

7. Оценить величину силы излучения в дальней зоне для гелий-неонового лазера. Сила излучения определяется по формуле:  $I = \frac{\Phi}{\Omega}$ , где  $\Phi$  - мощность лазера. Учесть, что выходная мощность He-Ne лазера изменяется в интервале  $10^{-3} - 10^{-1}$  Вт.

8. Для получения плоскополяризованного излучения гелий-неонного лазера на длине волны 0,63 мкм и уменьшения потерь на отражение в его резонаторе активную среду ограничивают с торцов плоскопараллельными стеклянными пластинками, которые устанавливаются таким образом, что нормали к их поверхностям составляют строго определенный угол с направлением распространения излучения. Этот угол носит название угла Брюстера.

Вычислите величину угла Брюстера, если показатель преломления света материалом пластинки равен  $n = 1.4$ .



9. Чему равен угол между отраженным и преломленным лучами при падении под углом Брюстера?

10. Вычислить коэффициент усиления лазерного кристалла длиной 10 см, если его показатель усиления равен  $2 \text{ см}^{-1}$ , а уровень потерь в нем составляет  $0.4 \text{ см}^{-1}$ .

11. Ненасыщенный логарифмический коэффициент усиления лазера на парах меди  $\tilde{K}_0 = 40$  децибел. Найти условие для коэффициента обратной связи  $\beta$ , при котором возможна генерация.

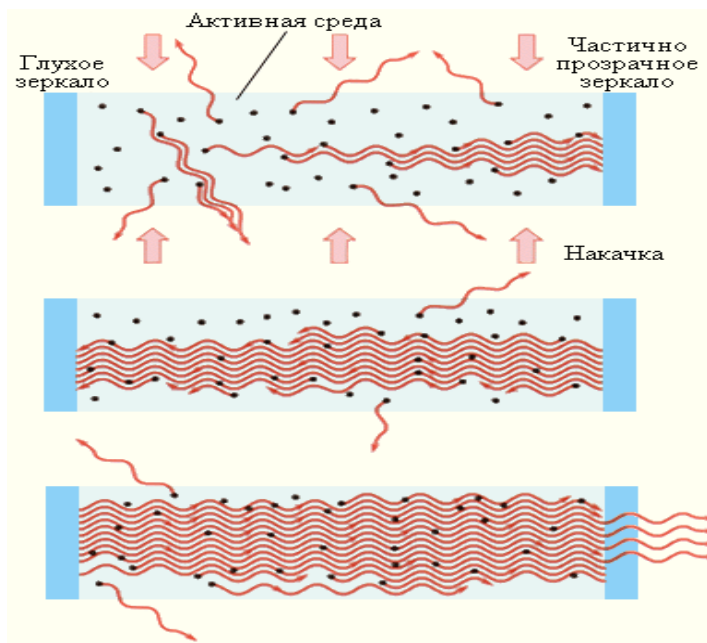
12. Насыщенный коэффициент усиления лазера равен 1.5, а превышение равно двум. Чему равен ненасыщенный коэффициент усиления при начале генерации?

13. Ненасыщенный показатель преломления рубинового лазера  $k_0 = 0.1 \text{ см}^{-1}$ , а длина активной

среды  $l = 10$  см. Найти условие для коэффициента обратной связи, при котором возможна генерация.

14. Имеется активный кристалл длиной 6 см, на котором было измерено полуторакратное усиление сигнала на длине волны, соответствующей инвертированному переходу при определенном заданном уровне накачки. Показатель рассеяния излучения равен  $0.02 \text{ см}^{-1}$ .

Можно ли получить генерацию на таком кристалле при использовании зеркал с коэффициентами отражения  $r_1 = 0.5$  и  $r_2 = 0.8$ ?



Возникновение и развитие генерации в активной среде

**15.** Можно ли добиться генерации (см. задачу 14), выбирая более длинные кристаллы с теми же параметрами среды и отражающих покрытий?

**16.** Можно ли получить генерацию на таком кристалле (см. задачу 14) с теми же параметрами среды и при использовании зеркал с коэффициентами отражения  $r_1 = 1$  и  $r_2 = 0.8$ ?

**17.** Предположим, что по конструктивным соображениям длину кристалла (см. задачи 14 и 15) увеличивать нежелательно.

Можно ли на этом кристалле получать генерацию не увеличением длины, а уменьшением показателя рассеяния за счет применения более совершенной технологии выращивания кристалла? Допустим, что длина кристалла  $l = 5$  см.

**18.** При какой минимальной длине активного кристалла твердотельного лазера можно получить генерацию, если показатель распределенных потерь излучения в кристалле равен  $0.003 \text{ см}^{-1}$ , а резонатор лазера образован глухим ( $r_1 = 1$ ) и полупрозрачным ( $r_2 = 0.5$ ) зеркалами?

**19.** Какова должна быть длина кристалла с показателем усиления порядка  $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , чтобы с его помощью можно было увеличить интенсивность входного сигнала в 150 раз?

**20.** Какова должна быть длина кристалла с показателем усиления порядка  $10^{-2} \text{ см}^{-1}$ , чтобы с его помощью можно было увеличить интенсивность входного сигнала в 100 раз?

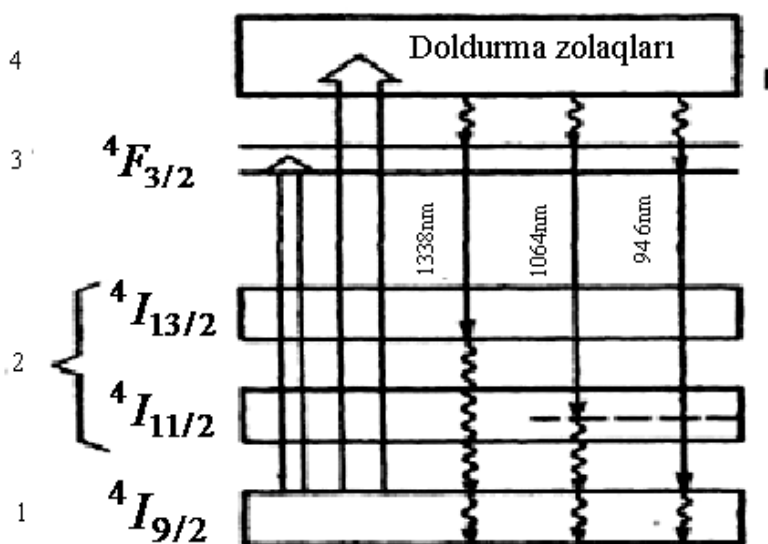
**21.** Лазерный кристалл длиной 10 см помещен в резонатор, зеркала которого имеют коэффициенты отражения на частоте генерации  $r_1 = 100\%$  и  $r_2 = 37\%$ . Нерезонансные потери в кристалле составляют  $\beta = 0.07 \text{ см}^{-1}$ . Найти пороговое значение показателя усиления кристалла.

**22.** В неодимовом Nd:YAG лазере длина резонатора равна 50 см. Определить относительную разность в коэффициентах усиления соседних продольных мод, одна из которых находится в центре линии усиления. Полная ширина линии усиления на полувысоте равна  $6.5 \text{ см}^{-1}$ .

**23.** Оценить минимальную мощность накачки, какую должна поглотить активная среда Nd:YAG лазера для поддержания стационарного состояния

инверсии населенностей между рабочими уровнями неодима. Будем учитывать, что возникновение инверсии населенностей означает, что на верхнем рабочем уровне число ионов  $\text{Nd}^{3+}$  равно числу ионов на нижнем рабочем уровне ( $N_{\text{yuxari}} \approx N_{\text{aşağı}} = N_0 / 2$ ). Полагаем, что длина и диаметр стержня активного элемента равны 6.5 см и 0.4 см, соответственно.

### Полосы накачки



Время жизни метастабильного уровня равно  $2.5 \cdot 10^{-4}$  с, населенность основного уровня иона  $\text{Nd}^{3+}$  -  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Рассмотрим 3 варианта рабочих переходов:

- 1) Переход  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ ;  $\lambda = 1338 \text{ нм}$ ;  $N_2 = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ;
- 2) Переход  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ ;  $\lambda = 1064 \text{ нм}$ ;  $N_2 = 1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;
- 3) Переход  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ ;  $\lambda = 946 \text{ нм}$ ;  $N_2 = 0.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

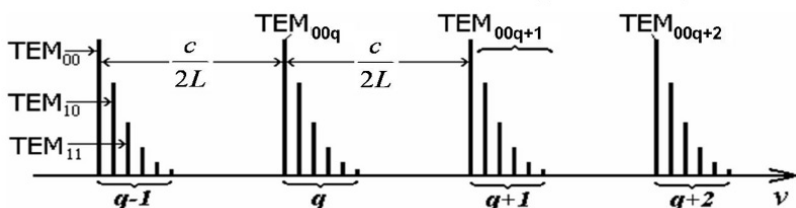
**24.** Определить скорость накачки необходимую для обеспечения минимальной мощности накачки

Оценку произвести для лазера, параметры которого приведены в задаче 23.

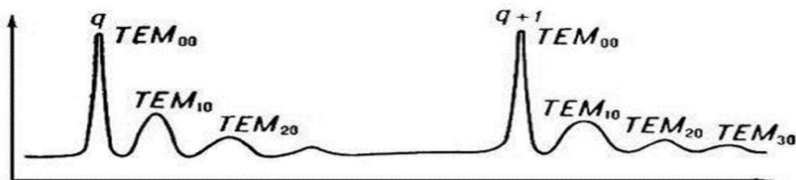


## II ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

На рисунке представлен типичный спектр открытого резонатора в случае круглых зеркал.



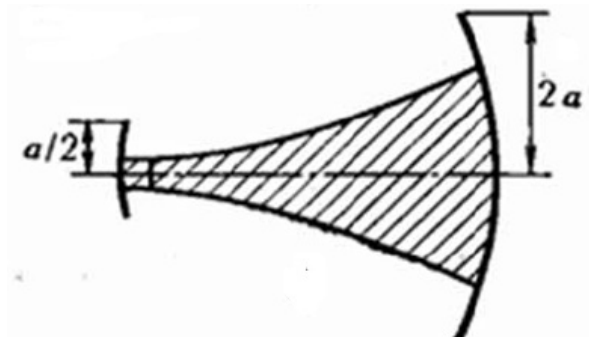
Величина каждой спектральной линии соотносится к соответствующему резонансу с внешним электромагнитным полем. Нижний рисунок дает более подробную картину особенностей спектра открытого резонатора



Как видно из рисунка различны не только интенсивности резонансных мод, но и ширины спектральных линий различных поперечных мод. Этот факт свидетельствует о том, что для разных мод величина потерь различна. На полувывсоте ширина спектральной линии и величина потерь  $\Delta E_T$  (для периода колебаний) связаны соотношением  $\Delta \nu = \frac{\nu}{2\pi} \frac{\Delta E_T}{E}$ . Здесь  $E$  - энергия электромагнитного поля в моде оптического резонатора.

**25.** На сколько изменится частота продольной моды, если длину резонатора увеличить на  $\lambda$  ?

**26.** Вычислите размер пятна излучения на обоих зеркалах полуконфокального резонатора длиной  $L = 2$  м, используемого в  $\text{CO}_2$  - лазере, работающем в одномодовом режиме на длине волны  $\lambda = 10.6$  мкм.



**27.** Определить разность частот между двумя соседними продольными модами резонатора, описанного в задаче 3.2.

Считая, что в  $\text{CO}_2$ -лазере ширина линии излучения, определяемая по уровню 0.5 от максимального значения, равна 50 МГц, найдите число продольных мод, частоты которых находятся в пределах этой линии.

**28.** В  $\text{CO}_2$ -лазере низкого давления ширина линии 50 МГц определяется главным образом доплеровским уширением. Лазер работает при мощности накачки, которая в два раза превышает пороговую мощность накачки.

Вычислите максимальное расстояние между зеркалами лазерного резонатора, при котором еще возможна генерация в режиме одной продольной моды.

**29.** Полуширина доплеровского контура усиления равна 1600 МГц. Оцените число продольных мод, генерируемых лазером с длиной резонатора 0.5 м. Каким образом можно обеспечить одночастотный режим генерации?

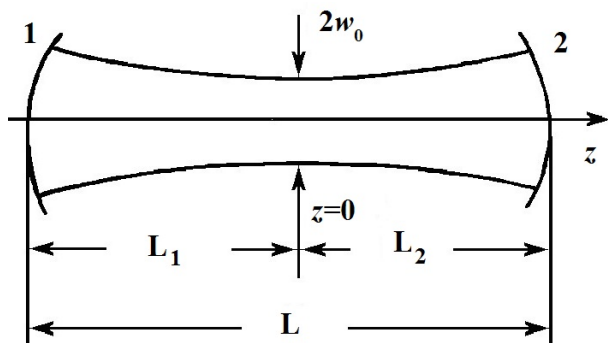
**30.** Мощность излучения одночастотного гелий-неонового лазера на длине волны 0,63 мкм равна 1 мВт. В лазере используется резонатор с добротностью  $Q = 10^8$ .

Найдите теоретически возможную ширину спектральной линии излучения лазера.

**31.** Распределение поля на поверхности резонатора лазера и фазовый сдвиг зависит от числа Френеля.

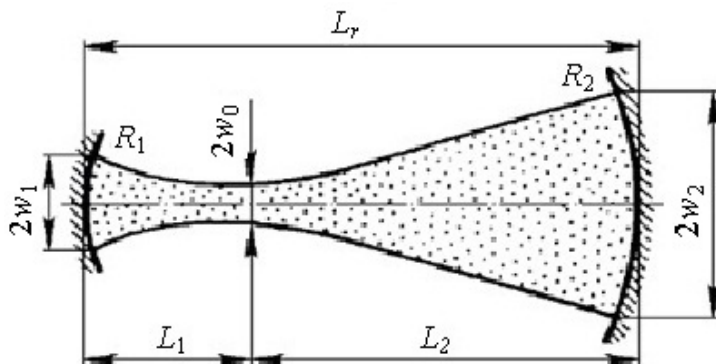
Вычислите число Френеля лазерного резонатора длиной 0.5 м и размером апертуры 10 мм, если лазер работает на длине волны 0.63 мкм.

**32.** Лазерный резонатор образован двумя одинаковыми зеркалами с радиусом кривизны  $R = 20$  см,



находящимися на расстоянии  $L = 5.3$  см друг от друга. Вычислите, насколько частоты моды  $TEM_{10}$  отстоят от частот моды  $TEM_{00}$  в таком резонаторе.

**33.** Несимметричный резонатор состоит из двух вогнутых зеркал, отстоящих друг от друга на расстояние 0.45 м. Радиусы кривизны зеркал  $R_1 = R_2 = 2.0$  м.



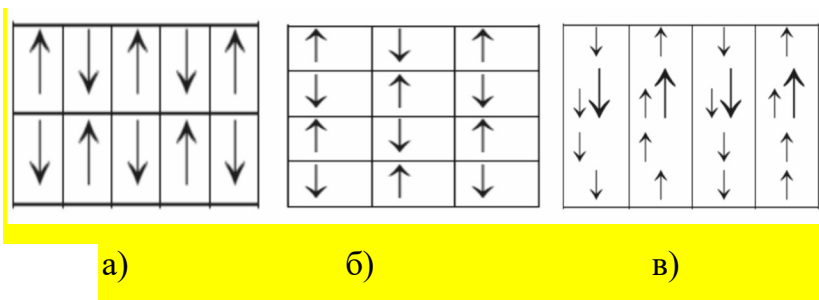
Рассчитайте местоположение перетяжки пучка  $z_0$  и ее размер  $w_0$ , если длина волны излучения  $1.06 \text{ мкм}$ .

**34.** Несимметричный резонатор состоит из двух вогнутых сферических зеркал, отстоящих друг от друга на расстоянии  $0.45 \text{ м}$ . Радиусы кривизны зеркал  $R_1 = 0.5 \text{ м}$  и  $R_2 = 2 \text{ м}$ , рассчитать место положения перетяжки пучка излучения ( $z_0$ ) в резонаторе и ее размер ( $w_0$ ), если длина волны излучения  $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$ .

**35.** На каком расстоянии от лазера формируется дальняя зона при  $\lambda = 1 \text{ мкм}$  и диаметре лазерного пучка в  $10 \text{ см}$ ? Оценить минимальную величину

радиуса кривизны волнового фронта в ближней зоне, где радиус перетяжки пучка излучения равен 1 мм.

**36.** Лазер имеет резонатор с прямоугольными зеркалами и генерирует пучок многомодового излучения. В поперечном сечении пучка может наблюдаться картина световых пятен, изображенная на рис. а, б, в.



Определить наблюдаемую многомодовую структуру, записав ее в виде полярной моды  $TEM_{mn}$  (то есть определить индексы  $m$  и  $n$ ).

**37.** Лазерный резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами с радиусом кривизны  $R = 20$  см, находящимися на расстоянии 5.8

см друг от друга. Вычислить частотное расстояние между модами  $TEM_{00}$  и  $TEM_{10}$  в таком резонаторе, если:

а) зеркала имеют прямоугольную форму;

б) зеркала имеют круглую форму.

**38.** Вычислить число Френеля лазерного резонатора длиной 0.75 м и с размером апертуры 10 мм, если лазер работает на длине волны  $\lambda = 1$  мкм.

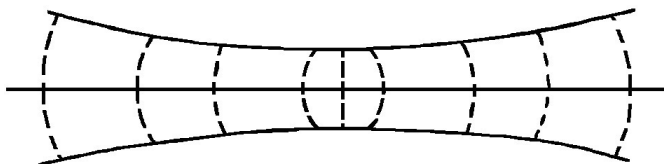
**39.** Длина лазерного резонатора равна 30 см, а суммарные потери излучения в нем за полный проход составляют 1 %. Вычислить спектральную ширину линии резонансной кривой резонатора, полагая, что лазер работает в одночастотном режиме.

**40.** Резонатор гелий-неонового лазера, работающего на длине волны излучения  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ , имеет малые дифракционные потери. Длина лазерного резонатора 1 м, коэффициент суммарных потерь излучения за один полный проход резонатора



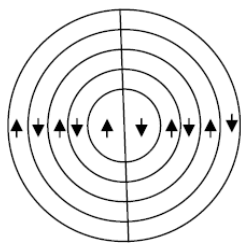
составляет 0.02. Вычислить  $Q$  добротность резонатора и спектральную ширину линии его резонансной кривой, полагая, что лазер работает в одночастотном режиме.

**41.** Несимметричный резонатор лазера состоит из двух вогнутых сферических зеркал, расположенных на расстоянии 0.6 м друг от друга. Из центра первого зеркала на поверхности второго наблюдается 40 зон Френеля, а из центра второго зеркала на поверхности первого – 90 зон Френеля.

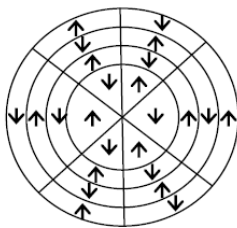


Вычислить диаметры зеркал резонатора и соответствующее ему число Френеля. Лазер излучает на длине волны  $4880 \text{ \AA}$ .

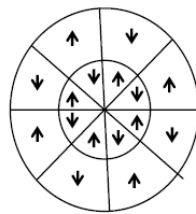
**42.** Лазер имеет резонатор с круглыми зеркалами и генерирует пучок многомодового излучения.



а



б)



в)

В поперечном сечении пучка может наблюдаться следующая пятнистая картина:

Записать наблюдаемые поперечные моды в виде  $TEM_{pl}$  (т.е. определить поперечные индексы  $p$  и  $l$ ).

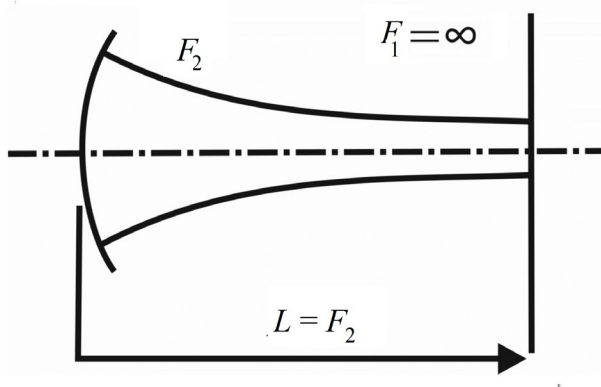
**43.** Имеется два вогнутых сферических зеркала, из которых необходимо составить устойчивый несимметричный резонатор. Радиусы кривизны отражающих поверхностей зеркал равны  $R_1 = 1$  м и  $R_2 = 0.5$  м.

Определить область значений длины  $L$  резонатора, для которых это требование выполняется.

**44.** Имеется два вогнутых сферических зеркала, из которых необходимо составить устойчивый несимметричный резонатор. Радиусы кривизны отражающих поверхностей зеркал равны  $R_1 = 1.5$  м и  $R_2 = 1$  м.

Определить область значений длины  $L$  резонатора, для которых это требование выполняется.

**45.** Рассчитать радиус лазерного пучка на выходном зеркале устойчивого оптического резонатора (см. рис.) и расстояние между продольными модами резонатора. Каковы координаты на G-диаграмме ( $g_i = 1 - L/R_i$ ) данной конфигурации устойчивого резонатора?



Полагаем, что длина волны излучения лежит в видимом диапазоне, а длина резонатора равна 1.5 м.

### III РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ

46. Чему равна длина волны второй гармоники излучения рубинового лазера?

47. Ширина линии генерации гелий-неонового лазера с синхронизацией мод составляет 0.6 ГГц, а спектр можно приближенно описать гауссовой функцией.

Вычислите соответствующую длительность выходного импульса, если выполняется условие на фазы мод  $\varphi_n - \varphi_{n-1} = \varphi_0 = const$ .

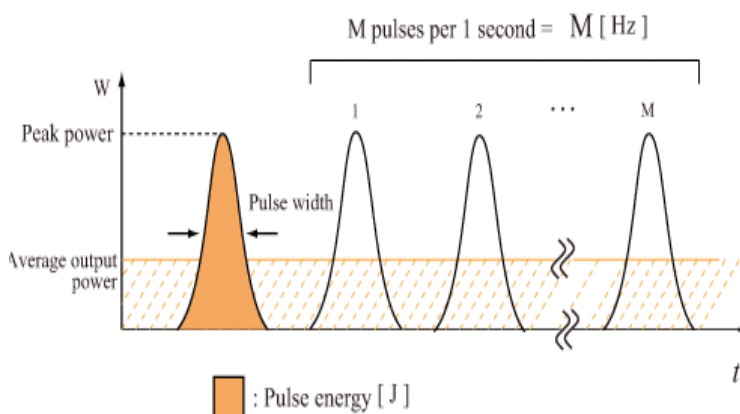
48. Лазер работает в режиме генерации одиночных импульсов. Форма отдельного импульса описывается функцией мощности излучения вида

$$P(t) = P_0 a t e^{-at},$$

где  $P_0$ ,  $a$  - постоянные (т.е. не зависящие от времени) для данной формы импульса величины.

Определить:

- а) полную энергию импульса излучения  $E_{из}$
- б) длительность импульса  $\tau_p$
- в) среднюю по времени мощность импульса  $P_{сред}$
- г) пиковую мощность импульса  $P_{max}$ .



**49.** Лазер работает в режиме генерации повторяющихся с частотой следования  $f$  импульсов. Форма отдельного импульса описывается функцией мощности излучения вида:

$$P(t) = P_0 a t e^{-bt^2},$$

где  $P_0$ ,  $a$ ,  $b$  - постоянные (т.е. не зависящие от времени) для данной формы импульса.

Определить:

- а) полную энергию импульса излучения  $E_{из}$
- б) длительность импульса  $\tau_p$
- в) среднюю по времени мощность излучения лазера  $P_{сред}$
- г) пиковую мощность импульса излучения  $P_{max}$ .

**50.** Лазер работает в режиме модулированной добротности (Q-switch) на одной основной поперечной моде и генерирует последовательность одинаковых импульсов с частотой следования  $f = 10$  кГц и средней мощностью, которая в  $10^4$  раз меньше пиковой мощности.

Определить время и длину когерентности излучения лазера.

**51.** Лазер имеет резонатор длиной 45 см и работает в режиме генерации непрерывного излучения мощностью 3 Вт на одной поперечной ТЕМ<sub>00</sub>. Ширина линии люминесценции рабочего перехода активной среды лазера равна 500 ГГц. После осуществления в

лазере режима синхронизации фаз продольных мод он начал генерировать последовательность ультракоротких импульсов.

Определить:

- а) частоту следования импульсов  $f$ ,
- б) длительность импульсов  $\tau_p$ ,
- с) пиковую мощность импульса  $P_{\max}$  и его энергию,
- д) как изменяются величины  $f$ ,  $\tau_p$ ,  $w$ , если длину резонатора лазера увеличить до 60 см?

**52.** Какими тремя способами можно получить импульсный режим генерации лазера?

**53.** Неодимовый Nd:YAG лазер может работать в непрерывном и импульсном режимах. Длина оптического резонатора равна 50 см, коэффициент усиления в активной среде равен  $6.5 \text{ см}^{-1}$ . Одно из зеркал резонатора глухое, второе выходное зеркало имеет коэффициент отражения 0.9 для лазера, работающего в непрерывном режиме и 0.5 для лазера в импульсном режиме. Энергия поля в резонаторе за



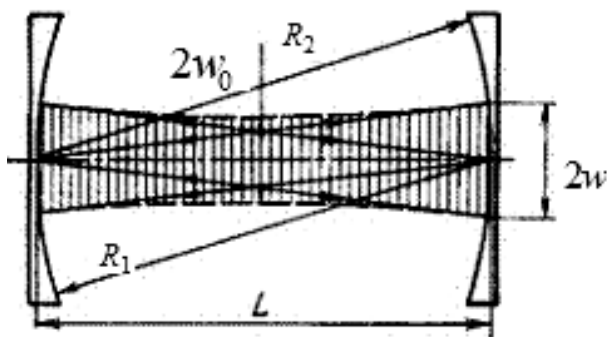
счет потерь в резонаторе убывает с постоянной времени  $\tau_p$ , а в активном элементе - с постоянной времени  $\tau_a$ . Определить коэффициенты полезных, пассивных и полных потерь, а также постоянную  $\tau_p$  для обоих режимов генерации.

#### IV СВОЙСТВА ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

**54.** Покажите, что полная мощность гауссова пучка определяется выражением

$$P(z) = (\pi w^2) \cdot I_0(z),$$

где  $I_0$  -интенсивность пучка на оси,  $w$  -радиус пучка.



Конфокальный резонатор (заштрихованная область показывает распределение электромагнитного поля излучения внутри резонатора)

**55.** Размер пятна перетяжки гауссова пучка, излучаемого He-Ne лазером с длиной волны излучения 0.63 мкм, равен 0.5 мм.

Вычислите размер пятна пучка и радиус кривизны поверхности волнового фронта на расстоянии 10 м от перетяжки.

**56.** В некоторой произвольно выбранной точке на оси гауссова пучка размер (диаметр) светового пятна равен 1 см, а радиус кривизны волнового фронта – 2 м.

Найдите угол расходимости и конфокальный параметр пучка, если длина волны его излучения равна 1 мкм.

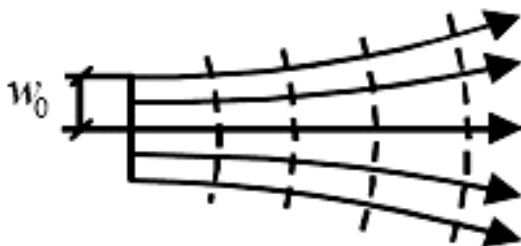
**57.** Во сколько раз нужно уменьшить угол расходимости лазерного излучения, чтобы  $I$  сила излучения возросла в два раза?

**58.** Чему равна сила света  $I = \frac{\Phi}{\Omega}$  излучения  $\text{CO}_2$  – лазера мощностью 1 кВт и углом расходимости, равным 2 мрад?

**59.** Сравните освещенности от точечного источника (лампы) мощностью 100 Вт на расстоянии 10 м и от гелий-неонового лазера мощностью 1 милливатт на расстоянии 1000 м (радиус пучка в перетяжке – 0.5 мм).

**60.** Сравните освещенность экрана от точечного источника (лампы) мощностью 100 Вт на расстоянии 10 м и от гелий-неонового лазера мощностью 1 милливатт в перетяжке и на расстоянии 1000 м от перетяжки (радиус пучка в перетяжке – 0.3 мм).

**61.** Рассчитать минимальное значение радиуса кривизны волнового фронта и расстояние  $z$ , на котором это происходит. Дать зависимость радиуса кривизны волнового фронта от расстояния до перетяжки в ближней зоне.



Вид световых лучей в ближней зоне

**62.** На каком расстоянии от перетяжки кривизна волновой поверхности гауссова пучка становится максимальной? Во сколько раз при этом возрастает поперечный радиус пучка?

**63.** Каким должен быть угол расходимости излучения лазера мощностью 1 мВт, чтобы сила излучения равнялась  $I = 10^4$  Вт/ср. Изменяется ли средняя сила излучения для лазерного пучка в дальней зоне?

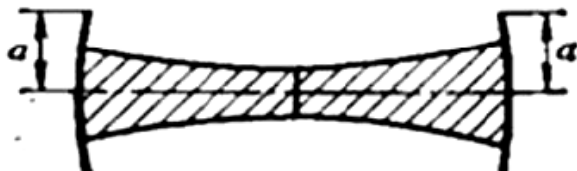
**64.** Излучение с круговой поляризацией проходит через четвертьволновую фазовую пластинку. Какова форма поляризации на выходе пластинки?

**65.** Естественное излучение проходит через поляризатор и четвертьволновую фазовую пластинку. При какой ориентации пластинки относительно поляризатора прошедшее излучение будет иметь левую круговую, правую круговую и линейную поляризации?

**66.** В некоторой произвольно выбранной точке  $z_0$  на оси гауссова пучка радиус волнового фронта равен 1 м. найдите размер перетяжки пучка и его конфокальный параметр, если угол расходимости пучка  $5.7^\circ$ , а длина волны его излучения 0.63 мкм. Найдите размер пятна пучка в его поперечном сечении в точке  $z_0$ .

**67.** Интенсивность лазерного пучка уменьшилась в два раза на расстоянии 1 мм от оси пучка. Чему равен при этом поперечный радиус пучка  $w$ , т.е. размер пятна?

68. Излучение лазера имеет форму гауссова пучка с конфокальным параметром 100 см и размером перетяжки 1 мм.



Найдите длину волны излучения лазера и угол его расходимости. Найдите радиус волнового фронта излучения на расстоянии 1 м от перетяжки пучка.

69. Лазер с конфокальным резонатором длиной 40 см генерирует излучение с длиной волна 1.06 мкм, которое фокусируется линзой с фокусным расстоянием 50 см, расположенной на расстоянии 1 м от выходного зеркала лазера.

Какой размер пучка имеет излучение в фокальной плоскости линзы?

70. Какой длины необходимо было бы выбрать конфокальный резонатор рубинового лазера, чтобы его излучение, будучи направлено в сторону Луны,

осветило круг диаметром 1 км? Предположите, что у вас имеется рубиновый стержень сколь угодно большого диаметра. Расстояние до луны принять равным 384000 км.

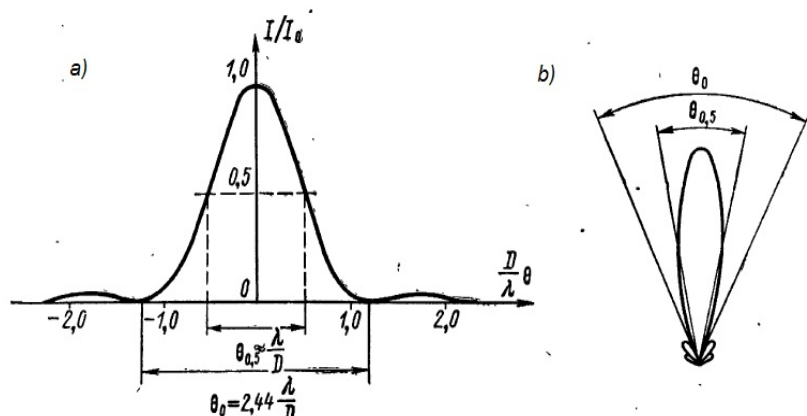
71. В газовом лазере с конфокальным резонатором длины 3 м, диаметр пятна на выходе зеркала составляет 5 мм и увеличивается до 45 мм на расстоянии 22 м от лазера. Определить расходимость лазерного пучка.

72. Сравнить расходимость лазерного излучения для двух твердотельных лазеров (рубинового и неодимового). Считать размер выходного зеркала  $\sim 1$  см.

73. Определите частотные характеристики излучения лазера с длиной волны 1 мкм и апертурой 8 мм, если его резонатор имеет длину 0.45 м и зеркала с радиусами кривизны  $R_1 = 0.84$  м и  $R_2 = 2$  м.



74. Выходное излучение лазера с длиной волны  $\lambda = 633$  нм имеет форму гауссова пучка. Полный угол



Теоретическая диаграмма направленности круглой излучающей площадки: а – в декартовой, б- полярной системах координат.

расходимости пучка, измеренный в его дальней зоне по уровню  $e^{-2}$ , равен пяти угловым минутам.

Определить конфокальный параметр лазерного пучка.

75. Что называют каустикой гауссова пучка и что называют его шириной? Какой функцией описывается кривая каустики?

**76.** Что называют конфокальным параметром гауссова пучка и почему он имеет такое название?

**77.** Что называют перетяжкой пучка и как она связана с конфокальным параметром?

**78.** Какой угол называют углом расходимости гауссова пучка? Можно ли сказать, что физический смысл угла расходимости гауссова пучка состоит в том, что он является углом дифракции пучка на своей перетяжке?

**79.** Что называют радиусом кривизны волнового фронта гауссова пучка? На каком расстоянии от перетяжки радиус кривизны волнового фронта гауссова пучка принимает наименьшее значение?

**80.** Какими параметрами характеризуется гауссов пучок? Какое наименьшее число и каких параметров достаточно для полного описания гауссова пучка?

**81.** В пучок какой формы преобразуется гауссов пучок при его прохождении через тонкую сферическую линзу?

## **V ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ**

**82.** В установке по оптической локации Луны пучок рубинового лазера проходит через телескоп диаметром 1 м и посылается на Луну.

Рассчитайте диаметр пучка на Луне, предполагая, что пучок обладает полной пространственной когерентностью. Среднее расстояние от Земли до Луны принять равным 384000 км.

**83.** В установке по лазерной резке металлических листов пучок с плоским волновым фронтом излучения, круговым поперечным сечением и однородным распределением интенсивности фокусируется линзой.

Во сколько раз возрастет интенсивность в фокусе линзы по сравнению с интенсивностью падающей волны? Допустим, что диаметр лазерного пучка 1 см, длина волны лазерного излучения 0.7 мкм и фокус линзы 5 см.

**84.** Для получения плоскополяризованного излучения твердотельных лазеров и уменьшения потерь на отражение их резонаторов лазерные стержни устанавливают таким образом, что нормали, проведенные к их торцам, составляют угол Брюстера с направлением распространения излучения.

Вычислите величину угла Брюстера для рубинового лазера, Nd:YAG - лазера и Nd:стекло (Nd:Glass) – лазера, если торцы их стержней отполированы перпендикулярно осям стержней. Коэффициенты преломления материала стержней принять следующими:

для рубина  $\lambda = 0.69$  мкм,  $n = 1.76$ ,

для YAG  $\lambda = 1.06$  мкм,  $n = 1.82$ ,

для стекла  $\lambda = 1.06$  мкм,  $n = 1.4$ ,

для SiO<sub>2</sub>  $\lambda = 0.63$  мкм,  $n = 1.5$ .

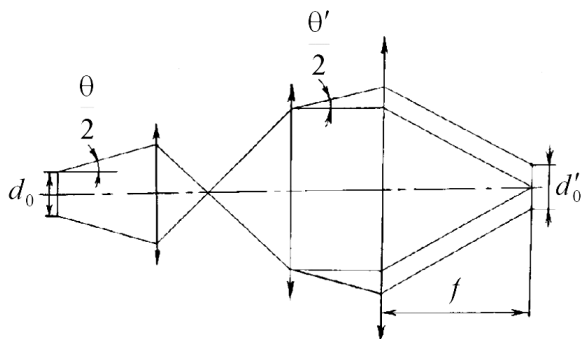
**85.** Неодимовый лазер генерирует последовательность одинаковых импульсов с частотой следования  $f = 100$  Гц. Длительность отдельного

импульса  $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$  с, его пиковая мощность  $P_0 = 100$  МВт.

Определить среднюю мощность излучения лазера.

**86.** Определить мощность и энергию импульсов излучения  $N_2$  - лазера длительностью  $\tau = 10^{-8}$  с, необходимые для достижения плотности мощности излучения в фокусе  $q_0 = 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, если расходимость пучка 1 мрад, а фокусное расстояние оптической системы составляет 3 см.

**87.** Определить, во сколько раз изменится диаметр пучка в фокусе линзы, если перед ней поставить телескопическую систему с увеличением  $b^x$ .



**88.** Построить ход лучей лазерного пучка через линзу с фокусным расстоянием  $f$ . Определить зависимость диаметра пятна в фокусе  $d_0$  от расходимости лазерного излучения  $\theta$  и фокусного расстояния линзы  $f$ .

**89.** Рассчитать оптическую проекционную схему с телескопической осветительной системой, с параметрами  $d_{обр} = 1$  мм (поперечный размер образца),  $d_{np} = 50$  мм,  $f_{np} = 50$  мм, диаметр лазерного излучения  $d_{л} = 1$  см,  $\beta_{np} = d_{обр}/d_{м} = 1/20$  (увеличение телескопической системы равно  $\beta_{телеск.сист.} = d_{м}/d_{л}$ ).

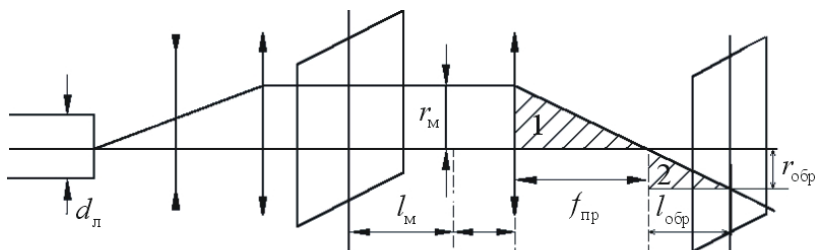


Схема телескопической проекционной системы

Увеличение телескопа произвольно, материал маски – медная фольга толщиной 0.1 мм, материал образца – пленка хрома толщиной 0.1 мкм на стекле.

**90.** Определить диапазон скорости сканирования  $V_{scan}$  пучка излучения непрерывного лазера при фокусировке его излучения в пятно диаметром 100 мкм, в пределах которого время эффективного воздействия находится в пределах  $10^{-3} - 10^{-9}$  с.

**91.** При каком соотношении длины волны, фокусного расстояния линзы и радиуса пучка в перетяжке, радиус преобразованного пучка в перетяжке будет равен исходному значению радиуса пучка в перетяжке?



**92.** Какая требуется энергия лазерного излучения, чтобы испарить графитовый материал толщиной 70 мкм? Принять радиус сфокусированного лазерного пятна равным 25 мкм.

**93.** Оценить плотность мощности лазерного излучения, необходимую для нагревания поверхности материала до плавления при длительности лазерного импульса  $10^{-8}$  с и  $10^{-3}$  с. Считаем, что поглощение излучения материалом составляет 100%. Рассмотреть два материала: а) хром и в) кремний.

**94.** Оценить плотность мощности лазерного излучения, необходимую для нагревания поверхности материала до испарения при длительности лазерного импульса  $10^{-8}$  с и  $10^{-3}$  с. Считаем, что поглощение излучения материалом 100%. Рассмотреть два материала: а) бериллий и в) молибден.

## VI ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

**95.** Лазер с несимметричным резонатором длиной 0.46 м, образованным двумя зеркалами с радиусами кривизны  $R_1 = 0.84$  м и  $R_2 = 2$  м, генерирует излучение видимого диапазона ( $\lambda = 0.5$  мкм) на основной моде  $TEM_{00}$ .

Найдите угол расходимости пучка основной моды и радиус кривизны его волнового фронта.

**96.** В большинстве случаев мощность выходного излучения непрерывного лазера достаточно хорошо описывается выражением

$$I_{\text{вых}} = \frac{1-R}{1+R} \left( \frac{2G_0 l}{2\beta l - \ln R} - 1 \right) I_s,$$

где  $I_{\text{вых}}$  -интенсивность выходного излучения,  $I_s = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> – интенсивность насыщения активной среды лазера (saturation),  $G_0 = 0.2$  см<sup>-1</sup> – показатель усиления

активной среды,  $\beta = 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  –показатель распределенных потерь излучения,  $r = 0.85$  - коэффициент отражения выходного зеркала лазера,  $l$  - длина активной среды. Напомним, что удельной мощностью выходного излучения лазера называется величина  $(P_{\text{вых}}/l)$ , где  $P_{\text{вых}}$  - мощность выходного излучения лазера. Очевидно, что величина  $\text{lazerin ıxıř řüalanmasının gücüdür. Aydındır ki, } (P_{\text{вых}}/l)$  может быть определена из выше приведенного выражения.

Определить, при каком значении длины активной среды с ее единицы длины снимается максимум удельной мощности (или удельной интенсивности  $I_{\text{вых}}/l$ ) выходного излучения лазера. Чему равно это максимальное значение  $I_{\text{вых}}/l$ ?

**97.** Гелий-неоновый лазер работает на длине волны  $\lambda = 3.39 \text{ мкм}$ . Его резонатор образован зеркалами круглой формы с диаметром отражающей поверхности  $d = 0.8 \text{ см}$

Вычислить величину угла дифракции излучения на зеркалах резонатора.

**98.** CO<sub>2</sub> лазер генерирует излучение мощностью  $P = 30$  Вт на длине волны  $\lambda = 10.6$  мкм. Его резонатор длиной  $L = 200$  см настроен на основную поперечную моду TEM<sub>00</sub>. добротность резонатора  $Q = 10^8$ .

Определить:

- а) частотное расстояние между продольными модами основной поперечной моды;
- б) спектральную ширину продольной моды;
- в) потери в резонаторе.

**99.** Лазер генерирует излучение мощностью  $P = 1$  мВт на длине волны красного цвета. Полагаем, что оптический резонатор имеет длину  $L = 1$  м и настроен на TEM<sub>00</sub> тип колебаний, потери на выходе составляют 2%.

Определить:

- а) частотное расстояние между продольными модами основной поперечной моды;
- б) спектральную ширину продольной моды резонатора.

**100.** Используя параметры лазера и оптического резонатора из задачи 99, определить:

а) предельную (теоретически минимальную) ширину спектральной линии излучения лазера;

б) с какой точностью следует обеспечить стабильность длины резонатора, чтобы теоретически определяемая ширина линии излучения лазера была достижима на практике.

**101.** He-Ne лазер на длине волны  $\lambda = 0.63$  мкм генерирует излучение мощностью  $P = 1$  мВт. Полагаем, что оптический резонатор имеет длину  $L = 75$  см и настроен на  $TEM_{00}$  основной тип колебаний. На выходе резонатора потери составляют 0.01.

Определить:

а) частотное расстояние между продольными модами основной поперечной моды;

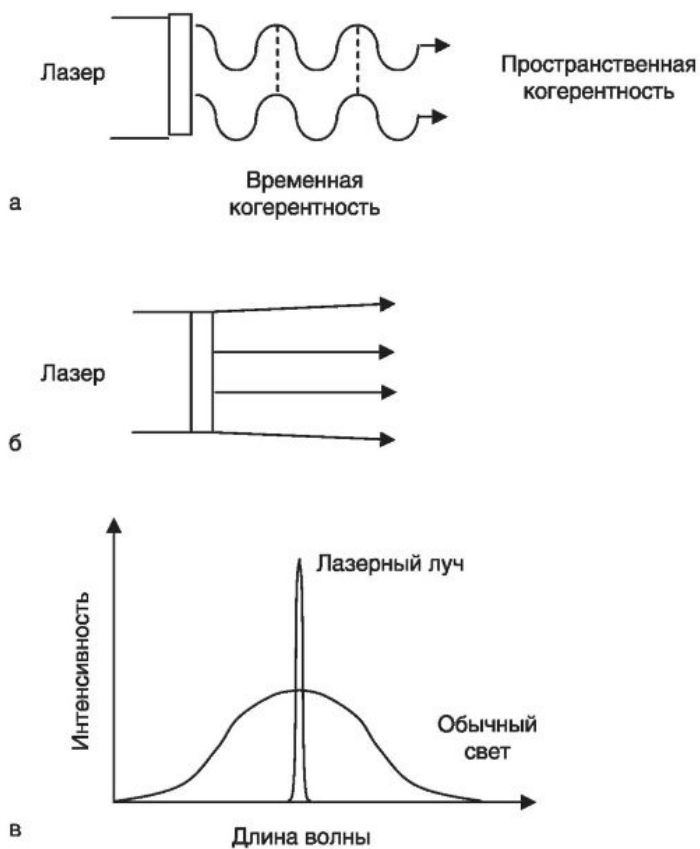
в) спектральную ширину продольной моды резонатора.

**102.** Используя параметры лазера и оптического резонатора из задачи 101, определить:

а) предельную (теоретически минимальную) ширину спектральной линии излучения лазера;

б) с какой точностью следует обеспечить стабильность длины резонатора, чтобы теоретически определяемая ширина линии излучения лазера была достижима на практике.

**103.** Сравнить длины когерентности для разных источников света: для многомодового гелий-неонового лазера, для одностороннего гелий-неонового лазера и для белого света.



**104.** В какую область спектра попадает излучение следующих лазеров:

- рубинового,
- неодимового,
- гелий-неонового,

- углекислотного ( $\text{CO}_2$ ),
- аргонового,
- CO,
- на парах металлов,
- HF,
- на растворах органических красителей,
- полупроводникового на GaAs,
- азотного ( $\text{N}_2$ )?

Какому цвету соответствует излучение этих лазеров?

**105.** Назовите хотя бы четыре лазера, излучение которых соответствует ИК-диапазону спектра.

**106.** Назовите хотя бы три лазера, длины волн которых попадают в УФ или ВУФ диапазоны спектра.

Какие проблемы необходимо решить, чтобы осуществить лазерную генерацию в этих областях?

**107.** Расскажите о проблемах, которые существуют в области создания рентгеновских и гамма-лазеров.



**108.** Какие из существующих лазеров могут быть использованы для хирургических целей, если для этого требуется непрерывный лазер с выходной мощностью более 20 кВт? Какой из этих лазеров наиболее предпочтителен и почему?

**109.** Какие из существующих лазеров могут быть использованы для обработки металлов, если для этого требуется непрерывный лазер с выходной мощностью более 1 кВт? Какой из этих лазеров наиболее предпочтителен и почему?

**110.** Каким образом можно измерить расходимость лазерного пучка?

**111.** Дайте определение и запишите аналитические выражения для следующих энергетических характеристик лазерного излучения:

- энергия,
- мощность,
- интенсивность,
- энергетическая яркость,

- спектральная плотность энергетической яркости,
- энергетическая освещенность,
- спектральная плотность энергетической освещенности.

Запишите единицы измерения этих величин.

**112.** Дайте определение и запишите аналитические выражения для следующих характеристик лазерного излучения:

- монохроматичность,
- поляризация,
- когерентность:
  - временная,
  - пространственная,
- направленность,
- угол расходимости.

## ДОПОЛНЕНИЯ

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная Планка  $h = 6.626 \cdot 10^{-27}$  эрг  $\cdot$  с =  $6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж  $\cdot$  с

Скорость света в вакууме  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/с =  $3 \cdot 10^8$  м/с

Постоянная Больцмана  $k = 1.38 \cdot 10^{-16}$  эрг/Дж =  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

Электрическая постоянная  $\varepsilon_0 \approx 0.885 \cdot 10^{-11}$  Ф/м

Магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

Масса протона  $m_p = 1.672 \cdot 10^{-24}$  г =  $1.672 \cdot 10^{-27}$  кг

Масса электрона  $m_e = 0.911 \cdot 10^{-27}$  г =  $0.911 \cdot 10^{-30}$  кг

1 аттосекунда =  $10^{-18}$  с

1 фемтосекунда =  $10^{-15}$  с

1 пикосекунда =  $10^{-12}$  с

1 наносекунда =  $10^{-9}$  с

## ПОЛЕЗНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ:

$$\lambda = \frac{hc}{1 \text{ эВ}} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/Гц}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 1.24 \text{ мкм}$$

$$E, \text{Джоуль} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{\lambda, \text{м}};$$

$$E, \text{эВ} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19}) \text{ эВ} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^9 \text{ нм/с}}{\lambda, \text{нм}} =$$
$$= \frac{1241.25}{\lambda, \text{нм}} = 1241 \text{ нм}^{-1}$$

При длине волны излучения  $\lambda = 1240 \text{ нм}$  энергия фотона равна  $E = 1 \text{ эВ}$  (при  $\lambda = 1 \text{ нм}$   $E = 1240 \text{ эВ}$ ). Данной энергии фотона в  $1 \text{ эВ}$  в сантиметровом диапазоне соответствует:

$$\lambda = 1240 \text{ нм} = 1.24 \cdot 10^{3-7} \text{ см} = 1.24 \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

откуда

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{10000}{1.24} = 8065 \text{ см}^{-1}.$$

Следовательно,

$$E, \text{ эВ} = \frac{8065}{\lambda, \text{ см}} = 8065 \text{ см}^{-1}$$

и при  $\lambda = 8065 \text{ см}$  энергия фотона равна

$$E = 1 \text{ эВ (при } \lambda = 1 \text{ см энергия } E = 8065 \text{ эВ)}.$$

Оценим: Как известно, согласно энергетической диаграмме верхнему энергетическому уровню гелия соответствует значение  $E \approx 165 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ . Преобразуем эту величину в электронвольты:

$$E = 165 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1} = 165 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \text{ эВ}}{8065} = 20.45 \text{ эВ}.$$

## **ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРОВ**

- 1917- Эйнштейн А. ввел понятие индуцированного испускания.
- 1932 – Фабрикант В.А. (СССР) выполнил исследования по оптике газовых разрядов.
- 1939 - Фабрикант В.А. (СССР) указал на возможность реализации отрицательного поглощения (усиления) в системах с инверсной заселенностью уровней.
- 1951 - Фабрикант В.А., Вудынский М.М. и Бутаева Ф.А. (СССР) экспериментально подтвердили возможность усиления электромагнитных волн за счет индуцированного испускания.
- 1954 - Басов Н.Г. и Прохоров А.М. (СССР) и независимо от них Таунс Ч. (США) разработали квантовый усилитель в СВЧ диапазоне (мазер).
- 1955 - Басов Н.Г. и Прохоров А.М. (СССР) предложили использовать метод оптической накачки для

создания инверсной заселенности уровней.

1956-1957 - Хенбери Браун Р. и Твисс Р. (США) выполнили первые эксперименты с использованием интерферометра интенсивности.

1957 - Басов Н.Г. (СССР) выдвинул идею использования полупроводников для создания оптических квантовых генераторов.

1958 – Шавлов А. и Таунс Ч. (США) и независимо от них Прохоров А.М. (СССР) теоретически обосновали возможность использования явления индуцированного испускания в оптическом диапазоне.

1960 – Мейман Т. (США) создал первый лазер (на рубине).

1960 – Джаван А. с сотрудниками (США) создал первый газовый лазер (на смеси гелия и неона).

1961-1962-Хохлов Р.В. с сотрудниками (СССР) и Бломбергин Н. с сотрудниками (США) выполнили основополагающие теоретические работы по нелинейной оптике.

1961- Франкел п. С сотрудниками (США)

получил генерацию второй гармоники.

1961 – Аскарьян Г. (СССР) предсказал явление самофокусировки света.

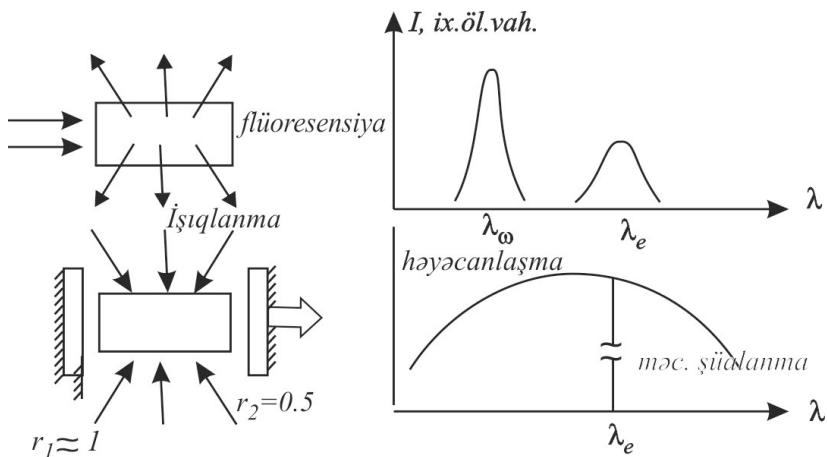
1962 – Ахманов С.А., Хохлов Р.В. (СССР) и независимо от них Кролл Н. и Кингстон Р. (США) выдвинули идею параметрической генерации света.

1962-1963 – в ряде лабораторий в СССР и в США почти одновременно были созданы первые полупроводниковые лазеры.

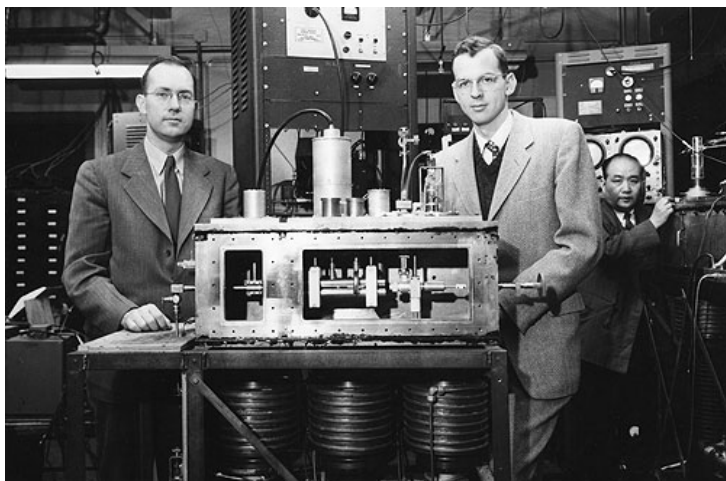
1964 – Басов Н.Г. и Крохин О.Н. (СССР) сформировали идею о возможности получения, высокотемпературной плазмы с помощью излучения лазера.

За исключительный вклад в создание и развитие квантовой электроники в 1964 и 1981 годах Нобелевскими премиями отмечены Басов Н.Г. (СССР), Прохоров А.М. (СССР), Таун Ч. (США), Бломберген Н. (США), Кастлер А. (Франция).





Спектры флуоресценции и вынужденного излучения



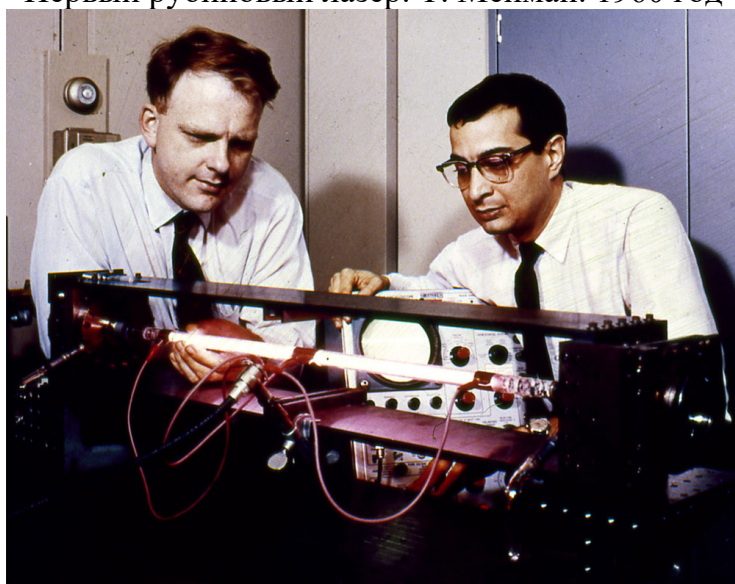
Слева Ч. Таунс (Charles Hard Townes–Нобелевские лауреаты



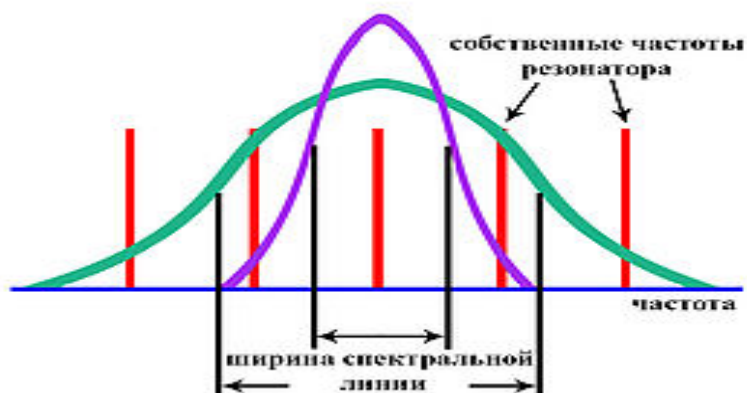
Н.Г. Басов и А.М. Прохоров –Нобелевские лауреаты



Первый рубиновый лазер. Т. Мейман. 1960 год



Первый He-Ne лазеры. А. Джаван. 1960 год.



**Спектральные линии излучения лазера**

## ВИДЫ УШИРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

### Однородное уширение:

- 1) естественное (радиационное) уширение

для атомов  $10^5 - 10^7$  Гц

для молекул  $10 - 10^3$  Гц

- 2) при столкновении (при  $p = 1$  mtor)

$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$  Гц

- 3) при столкновении со стенками сосуда

$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$  Гц

- 4) пролетное уширение  $10^3 - 10^4$  Гц

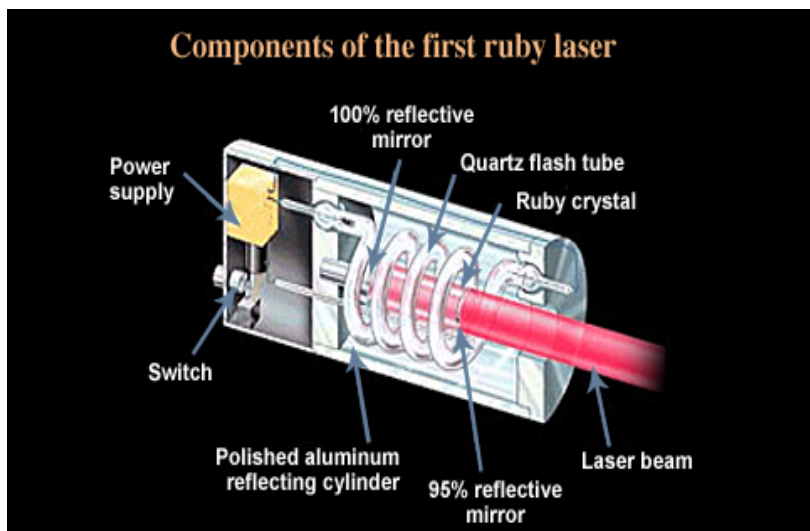
- 5) уширение в световом поле ( $p_{12}E/\hbar$ ,  $E$  - напряженность электрического поля,  $p_{12}$  - дипольный момент перехода) мощность электрического поля. При  $1 \text{ мВт/см}^2$

$10^4 - 10^5$  Гц

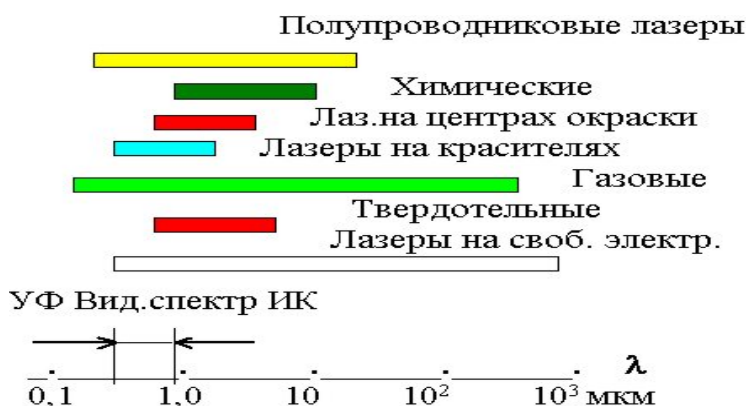
### Неоднородное уширение:

Доплеровское уширение ( $\nu = \nu_0 \pm k\nu$ )

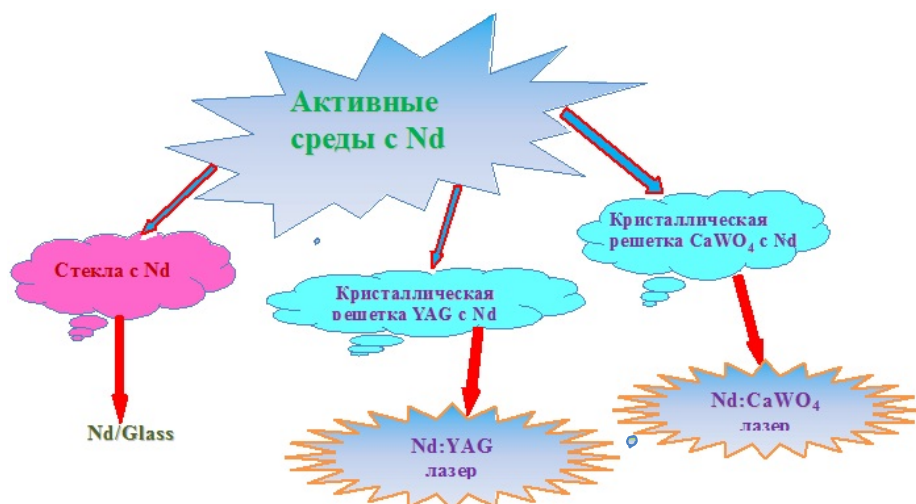
$10^8 - 10^{10}$  Гц



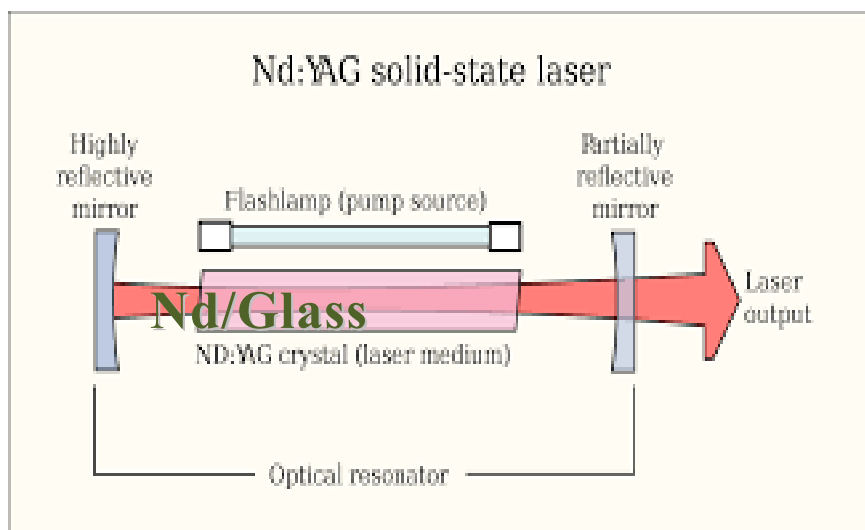
## Конструкция рубинового лазера

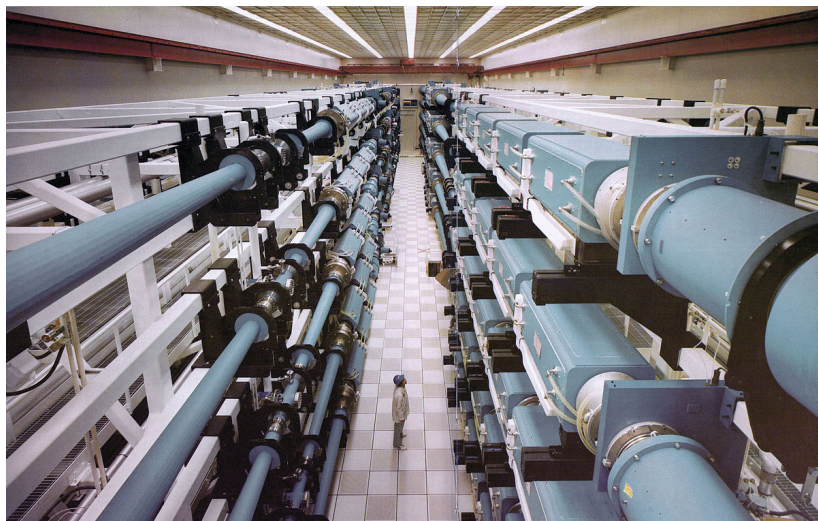


**Диапазоны длин волн генерации, перекрываемые действующими лазерами (кроме рентгеновских)**

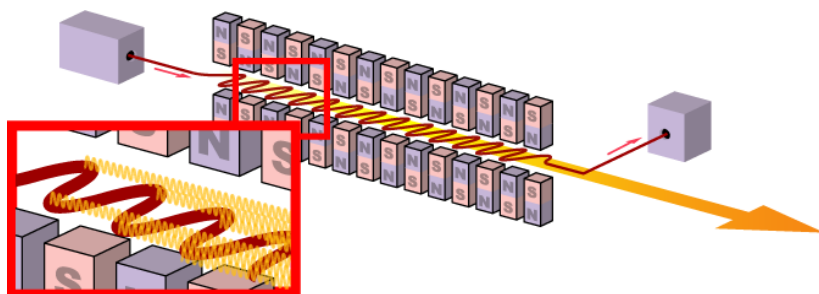


Среды, активированные неодимом Nd



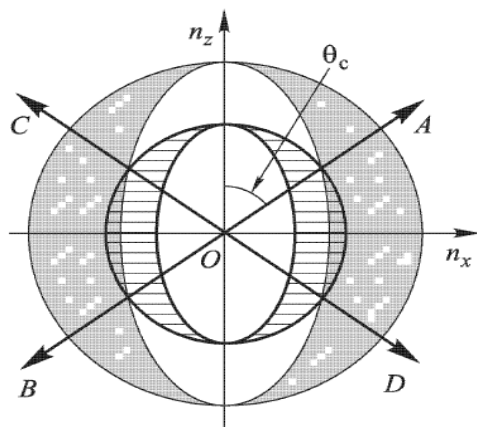


Здесь представлен 10-лучевой лазер LLNL Nova, (1984 год).

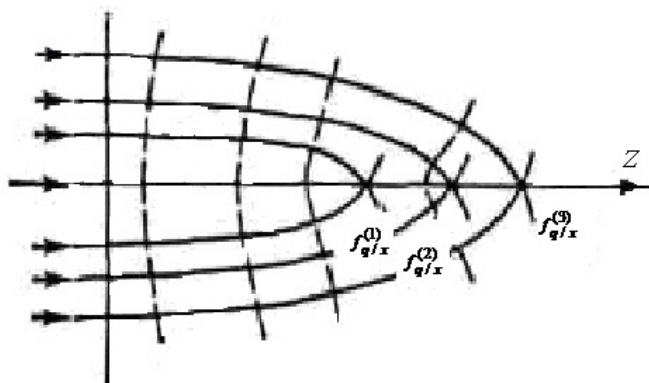


**Лазера на свободных электронах**





Условие синхронизма выполняется вдоль направления синхронизма АВ (CD). В результате в области нормальной дисперсии можно наблюдать генерацию второй гармоники в вырожденном случае трехволновых взаимодействий в реальных диспергирующих анизотропных средах.



Самофокусировка света.  $f_{нл}^{(1)}$ ,  $f_{нл}^{(2)}$ ,  $f_{нл}^{(3)}$  - нелинейные фокусы для трех световых пучков

## СРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Параметр	Критерий оценки	СО <sub>2</sub> лазер	YAG-Nd лазер с ламповой накачкой	YAG-Nd лазер с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1...30	1...30	1...5	1...4	1...4	1...30
Длина волны, мкм	как можно меньше	10,6	1,064	1,064 или 1,03	0,8...0,98	1,07
BPP (beam parameter product), мм · мрад	<10	3...6	22	22	>200	1,3...14
КПД, %	>20	8...10	2...3	4...6	25...30	20...25
Стабильность выходной мощности	как можно выше	низкая	низкая	низкая	высокая	очень высокая

## **ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

- Оптические методы записи, хранения и чтения информации.
- Оптическая связь. Оптическая локация, измерение расстояния оптическим путем.
- Лазеры в медицине.
- Управляемый термоядерный синтез сверхмощными лазерными лучами.
- Лазеры в метрологии.
- В машиностроении используются лазерные технологические комплексы при производстве автомобилей и летательных аппаратов.
- При решении экологических задач – лазерный контроль и мониторинг загрязнения атмосферы и поверхностей водоемов (морей, океанов и т.д.).

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R.C. Qasimova, R. Kərəməliyev. Kvant Elektronikasının Əsasları, BDU, 1991, 112 səh.
2. R.C. Qasimova, F.N. Hacıyev, Ş.Ş. Əmirov. Kvant elektronikasısı üzrə ixtisas praktikumu, BDU, 1994, 88 səh.
3. R.C. Qasimova. Kvant elektronikasısı kursu üzrə məsələlər toplusu həlli ilə. BDU, Bakı, "Bakı Universiteti" nəşriyyatı, 2008, 68 səh.
4. Z.H. Tağıyev, R.C. Qasimova, G.Ə. Səfərova. Qeyri-xətti optika, BDU, 2017, 284 səh.
5. Я.И. Ханин. Динамика квантовых генераторов, М., Советское радио, 1975, 496с.
6. Р. Пантел, Г. Путхоф, Основы квантовой электроники, М., Мир, 1972, 384с.
7. Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1983, 336с.
8. Маленькая энциклопедия под ред М.Е. Жаботинского. Советская энциклопедия. 1969, 432с.
9. А.Л. Микаэлян, М.Л. Тер-Микаэлян, Ю.Г. Турков. Оптические квантовые генераторы на твердом теле. М.: Советское радио, 1967, 384с.
10. А. Ярив. Квантовая электроника, М.: Советское радио, 1980, 488с.
11. А. Ярив. Введение в оптическую электронику, М.: Высшая школа, 1983, 400с.
12. О. Звелто. Физика лазеров, М., Мир, 1979, 373с.

13. О. Звелто. Принципы лазеров, М., Мир,. 1984, 396с.
14. В.П. Вейко, Е.А. Шахно. Сборник задач по лазерным технологиям. Санкт-Петербург, 2007, 63с.
15. А.Н. Пихтин. Оптическая квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001, 573с.
16. Справочник по лазерам в двух томах. Под ред. А.М. Прохорова. М.: Советское радио, 1978, 905с.
17. И.В. Тимофеев, В.П. Тимофеев, Д.А. Бадаев. Концентрированные потоки энергии и физические основы их генерации. Метод. указ. к практ. занятиям. Красноярск, 2007, 54с.
18. Ф. Качмарек. Введение в физику лазеров, М., Мир, 1981, 386с.
19. А. Мэйтленд, М. Данн. Введение в физику лазеров, М., Наука, 1978, 408с.
20. Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шоктн. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом, М. радио и связь, 1985, 144с.
21. Л.В. Тарасов. Физические основы квантовой электроники, М., 1976, 368с.
22. П.В. Короленко. Оптика когерентного излучения. М., 1997, 223.

## ОТВЕТЫ

### I \_\_\_\_\_

1.  $\gamma$  излучение, рентгеновское излучение, УФ, оптическое, ИК, терагерцовое излучение, микронные и радиоволны.
2.  $1/\text{с}, \text{м}^3 / \text{Дж} \cdot \text{с}^2$ .
3. 505.47 ГГц.
4. 2547.9 МГц.
5.  $-\frac{h\nu}{k \cdot \ln 2}$ .
6. 16 МГц.
7.  $7.8 \cdot 10^{9..11} \cdot w_0$ .
8.  $54.5^0$ .
9.  $\pi / 2$ .
10. Коэффициент усиления  $10^7$ .
11. 0.01.
12. 3.
13. 0.37.
14. Генерация невозможна; условия генерации не выполняется;  $0.9 < 1$ .

15. Генерация возможна; условие генерации выполняется при  $l \geq 5.8$  см.

16. Генерация возможна; условие генерации выполняется;  $0.06 > 0$ .

17. Генерация возможна при  $\beta \leq 0.008$  см<sup>-1</sup>.

18. 0.35 см.

19. 25 м.

20. 4.6 м.

21. 0.12 см<sup>-1</sup>.

22.  $10^{-5}$ .

23. а)  $1.5 \cdot 10^{-3}$  Вт; б) 0.79 Вт; в) 634 Вт.

24. На переходе

$$\text{а) } {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2} \quad w_q = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1};$$

$$\text{б) } {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2} \quad w_q = 0.15 \text{ с}^{-1};$$

$$\text{в) } {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} \quad w_q = 67 \text{ с}^{-1}.$$

II. \_\_\_\_\_

$$25. \quad \frac{c}{L}$$

26. На сферическом зеркале диаметр лазерного пятна  $2r_{1/e} = 0.068$  см; на плоском зеркале – 0.44 см.
27. 75 МГц, одна-две продольные моды могут генерировать в зависимости от потерь.
28. 3 м.
29. укладывается 10 мод.
30. 0.02 Гц.
31.  $N \sim 80$
32.  $\Delta\nu = 670$  МГц.
33.  $z_0 = 0.135$  м,  $w_0 = 0.37$  мм.
34.  $z_0 = 0.211$  м,  $w_0 = 0.24$  мм.
35. На расстояниях больше 7 км; 157 см.
36. а)  $m = 4$ ,  $n = 1$ ; б)  $m = 2$ ,  $n = 3$ ; в)  $m = 3$ ,  $n = 0$ .
37. а)  $\frac{cL}{16a^2q}$  (где  $a$  - апертура зеркала),  
б) 643.5 МГц.
38. 33.
39. 1.59 МГц.
40.  $500 \cdot 10^6$ ,  $\Delta\nu = 1$  МГц.
41. 0.68 см, 1.026 см,  $\approx 60$ .



42. а)  $p = 4$ ,  $l = 1$  ( $r$ ,  $\varphi$ ); б)  $p = 3$ ,  $l = 3$ ; в)  $p = 1$ ,  
 $l = 4$ .

43.  $0.5 \text{ м} \leq L \leq 1.5 \text{ м}$ .

44.  $1 \text{ м} \leq L \leq 2.5 \text{ м}$ .

45. 0.05 см; 100 МГц; полуконфокальный резонатор (1; 1/2).

### III \_\_\_\_\_

46. Длина волны первой гармоники - 694 нм, второй гармоники – в два раза меньше 347 нм.

47. 0.74 нс.

48. а)  $0.8 P_0 / a$ ; б)  $\tau_p = 3 / a$ ; в)  $0.27 P_0$ ; г)  $P_0 / e$ .

49. а)  $\frac{P_0 a [1 - \exp(-b / f^2)]}{2b}$ ; б)  $\frac{[1 - \exp(-b / f^2)]}{\sqrt{2b}} e^{-0.5}$ ,

в)  $\frac{f P_0 a [1 - \exp(-b / f^2)]}{2b}$ ; г)  $\frac{a P_0}{\sqrt{2b}} e^{-0.5}$

50.  $10^{-8}$  с; 300 м.

51. а)  $f = 3 \cdot 10^8$  Гц; б)  $\tau_p = 0.2 \cdot 10^{-11}$  с; в) 4.5 кВт;  
 $0.9 \cdot 10^{-8}$  Дж; г)  $f = 2.5 \cdot 10^8$  Гц,  $\tau_p$  не меняется,  
 $w = 12 \cdot 10^{-9}$  Дж.
52. При режимах свободной генерации, модулированной добротности и синхронизации мод.
53. Генерация в непрерывном режиме:  $0.0011 \text{ см}^{-1}$ ;  
 $0.00073 \text{ см}^{-1}$ ;  $1.784 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ;  $\tau_{res} = 1.86 \cdot 10^{-8}$  с;  
генерация в импульсном режиме:  $0.0069 \text{ см}^{-1}$ ;  
 $0.00073 \text{ см}^{-1}$ ;  $7.66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ;  $\tau_{res} = 4.35 \cdot 10^{-9}$  с.

#### IV \_\_\_\_\_

54. См. определение интенсивности.
55. 4 мм, 10.
56.  $5 \cdot 10^{-3}$  рад, 2.66 см.
57. Угол расходимости должен быть уменьшен в  $\sqrt{2}$  раза.
58.  $I = 0.318 \cdot 10^9$  Вт/ср.

59. Освещенность от лазера в 39.5 раз больше.

60.  $4,4 \cdot 10^3$ ; 112.

61.  $R_{\min} = 2\pi w_0^2 / \lambda$ ;  $z = \pi w_0^2 / \lambda$ .

62.  $z = \pi w_0^2 / \lambda$ ; в  $\sqrt{2}$  раза вырастет.

63.  $\theta = 0.356$  мрад. Не меняется.

64. Свет становится линейно поляризованным.

65.  $\pm \pi / 2$ ;  $\pm \pi / 4$ .

66.  $2 \cdot 10^4$  см,  $b = 4 \cdot 10^{-3}$  см, 10 см ( $z = 1$  м).

67. 1.2 мм.

68. 6.3 мкм;  $2 \cdot 10^{-3}$  рад; 1.25 м.

69. 0.54 мм.

70. километры.

71. 6'.

72. 14.5" и 22".

73. 330 МГц, 0.13 мрад,  $w_0 = 2.5$  мм,  $N \cong 134$ .

74. 14.4 см.

75. См. определение.

76. См. определение.

77. См. определение.

78. См. определение.

79. См. определение.

80. См. определение.

81. См. определение.

V \_\_\_\_\_

82.  $D = 646$  м.

83. Без учета начальной расходимости интенсивность в  $10^6$  раз увеличивается; с учетом начальной расходимости интенсивность в  $10^5$  раз увеличивается.

84.  $46.529^0$ ;  $61.24^0$ ;  $54.49^0$ ;  $56.34^0$ .

85. 300 Вт.

86. 70 Вт,  $7 \cdot 10^{-7}$  Дж.

87. Диаметр пучка в фокусе линзы уменьшится в  $b^x$  раз.

88.  $d_0 = \theta f$ .

89.  $\beta_{\text{телеск.сист.}} = 2$ ;  $l_{\text{обр}} = 2.5$  мм;  $l_{\text{м}} = 1$  м.

90.  $0.1 \text{ м/с} < V_{\text{скан}} < 10^5 \text{ м/с}$ .

91.  $w_o^2 = \frac{f \lambda}{\pi}$ .

92. 37 мДж.

93. а)  $2.5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-8}$  с) и  $7.8 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-3}$  с); б)  $1.4 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-8}$  с) и  $4.5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-3}$  с).

94. а)  $6.1 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-8}$  с) и  $1.9 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-3}$  с); б)  $8.1 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-8}$  с) и  $2.6 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> (при  $\tau = 10^{-3}$  с).

## VI

---

95. 0.091 м, 0.369 м, 0.26 мм, 0.612 мрад.

96. 33.02 см,  $4.6 \cdot 10^5$  Вт.

97.  $4.24 \cdot 10^{-4}$  рад.

98. а) 75 МГц; б) 0.57 МГц; с) 0.012.

99. а) 150 МГц; б) 1 МГц.

100. а)  $10^{-3}$  Гц; б)  $0.2 \cdot 10^{-7}$  Å.

101. а) 200 МГц; б) 0.64 МГц.

102. а)  $3.2 \cdot 10^{-4}$  Гц; б)  $10^{-8}$  Å.

103. 60 см;  $2 \cdot 10^7$  м; 1 мм.

104. В видимый диапазон спектра;

- рубиновый – видимый диапазон;
- неодимовый – ближний ИК диапазон;
- гелий-неоновый – в видимый и в ближний ИК диапазон;
- лазер на углекислом газе ( $\text{CO}_2$ ) – в средний ИК диапазон;
- аргоновый лазер – в видимый диапазон;
- СО лазер – в средний ИК диапазон;
- лазеры на парах металлов – в видимый диапазон спектра;
- HF лазер в средний ИК диапазон спектра;
- лазеры на органических красителях – в интервале ближний ИК – УФ диапазон спектра;
- полупроводниковый лазер на GaAs в видимый диапазон спектра;
- азотный лазер ( $\text{N}_2$ ) – УФ область спектра.

105.  $\text{CO}_2$ ; He-Ne; Nd, CO ( $\lambda_{\text{ген}} = 5 \text{ мкм}$ ).

106. Экимерный  $\text{Xe}_2^*$ ,  $\text{N}_2$  (0.31 мкм),  $\text{H}_2$  (0.1).

107. См. определение.

108.  $\text{CO}_2$ , He-Cd, экимерный лазеры.

109. CO<sub>2</sub>.

110. См. определение.

111. См. определение.

112. См. определение.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### **I Активные среды лазеров.**

**Усиление и генерация излучения.....**

### **II Оптические резонаторы.....**

### **III **Режим работы лазеров** .....**

### **IV Свойства лазерных пучков.....**

### **V Технологические системы на базе**

**твердотельных лазеров .....**

### **VI Технологические системы на базе**

**газовых лазеров.....**

**Дополнения.....**

**Исторические этапы создания лазеров.....**

**Основные области применения лазеров в  
науке и технике.....**

**Использованная литература**



## Отвѣты