

## 1.4. Поглощение и усиление электромагнитного излучения веществом.

### 1.4.1. Ослабление потока излучения. Закон Бугера - Ламберта.

Взаимодействие света (и вообще электромагнитного излучения) с веществом определяется индуцированными, или вынужденными, переходами и вообще сводится к двум процессам:

- 1) поглощение света невозбужденными частицами (атомами или молекулами), что приводит к ослаблению пучка;
- 2) преобразование внутренней энергии (избыточной) частиц в энергию электромагнитного излучения и колебания.

Пусть имеется однородная среда (для простоты рассмотрения) и из всех энергетических уровней выделим 2 уровня с энергиями  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_m$  (рис. 4.1). Пусть заселенности этих уровней в единице объема равны:  $N_n$  – число атомов в состоянии с энергией  $\varepsilon_n$ ,  $N_m$  – число атомов в состоянии с энергией  $\varepsilon_m$ . Пусть через среду проходит электромагнитное излучение в направлении оси  $x$  частоты

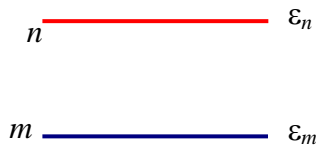


Рис. 4.1.

$$\omega = (\varepsilon_n - \varepsilon_m)/\hbar = \omega_{mn}.$$

Благодаря индуцированным переходам по мере прохождения излучения через среду его мощность будет меняться, т.е. будет меняться плотность потока энергии  $I_\omega$  [ $Bm/m^2$ ]. Ослабление плотности потока “ $-dI_\omega$ ” на участке  $(x, x + dx)$  пропорционально самой плотности потока  $I_\omega$  и расстоянию  $dx$  (см рис. 4.2):

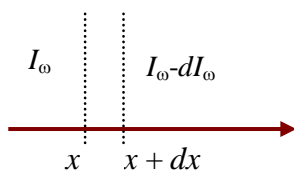


Рис. 4.2.

$$dI_\omega = -\alpha_\omega I_\omega dx \quad (1.4.1)$$

где  $\alpha_\omega$  – коэффициент поглощения. Получаем закон ослабления плотности потока излучения – закон Бугера - Ламберта:

$$I_\omega(x) = I_\omega^0 \cdot \exp(-\alpha_\omega x), \quad (1.4.2)$$

где  $I_\omega^0$  – плотность потока излучения при  $x = 0$ . Отметим, что для излучения можно написать, что плотность потока энергии равна  $I_\omega = c \cdot u(\omega, T)$ .

Как связан коэффициент поглощения  $\alpha_\omega$  с характеристиками вынужденного излучения и поглощения, которые были введены в предыдущем параграфе? Рассмотрим эти процессы, подключив равновесную плотность излучения  $u(\omega, T)$ . Величина “ $-dI_\omega$ ” определяется поглощением и индуцированным излучением

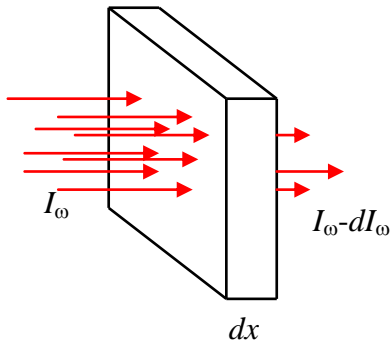


Рис. 4.3.

атомных частиц среды, находящихся в объеме  $dV$ , имеющем площадь основания  $S = 1 \text{ см}^2$  и длиной  $dx$  (см рис. 4.3). Тогда мощность, поглощаемая частицами объема  $dV$ , равна произведению числа поглощенных квантов на энергию кванта (см (1.3.5) - (1.3.6)):

$$dP_{abs} = N_m dV \cdot u(\omega, T) B_{mn} \cdot \hbar\omega \quad (1.4.3)$$

Мощность, получаемая за счет вынужденного (стимулированного) излучения частиц, находящихся в объеме  $dV$ , равна:

$$dP_{rad} = N_n dV \cdot u(\omega, T) B_{nm} \cdot \hbar\omega \quad (1.4.4)$$

Поскольку для элемента объема можно записать  $dV = S \cdot dx$ , а площадь площадки положить равной  $S = 1$  (или иначе, можно выражение

разделить на  $S$ ), получаем выражение для изменения интенсивности:

$$-dI_\omega = N_m dx \cdot u(\omega, T) B_{mn} \hbar\omega - N_n dx \cdot u(\omega, T) B_{nm} \hbar\omega \quad (1.4.5)$$

Так как  $u(\omega, T) = I_\omega/c$  и из формулы (1.3.11) имеем  $g_m B_{mn} = g_n B_{nm}$ , где  $g_m, g_n$  – статистические веса уровней, тогда получаем:

$$-dI_\omega = \frac{I_\omega}{c} \left( \frac{N_m}{g_m} - \frac{N_n}{g_n} \right) B_{mn} g_m \hbar\omega \cdot dx \quad (1.4.6)$$

Интегрируя, таким образом, вновь получаем закон Бугера - Ламберта

$$I_\omega = I_\omega^0 \cdot \exp(-\alpha_\omega x), \quad (1.4.7)$$

где коэффициент поглощения выражается через коэффициенты Эйнштейна и заселенности уровней:

$$\alpha_{\omega} = \frac{\hbar\omega}{c} g_m B_{mn} \left( \frac{N_m}{g_m} - \frac{N_n}{g_n} \right) \quad (1.4.8)$$

Если статистические веса (кратности вырождения) уровней одинаковы  $g_m = g_n$ , то получаем

$$\alpha_{\omega} = \frac{\hbar\omega}{c} B_{mn} (N_m - N_n) \quad (1.4.9)$$

Рассмотрим 2 случая.

1) В естественных условиях, или просто в равновесии при  $\varepsilon_n > \varepsilon_m$ , имеем:

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{g_n}{g_m} \exp\left[-\frac{\varepsilon_n - \varepsilon_m}{kT}\right] \quad (1.4.10)$$

то есть  $N_n < N_m$  и коэффициент поглощения  $\alpha_{\omega} > 0$ . Иначе говоря, происходит поглощение мощности электромагнитного излучения. Качественно зависимость интенсивности света от длины прохождения показана на рис. 4.4 А.

2) Если бы удалось создать *инверсную заселенность*, то есть выполнялось бы условие

$$\frac{N_m}{g_m} > \frac{N_n}{g_n},$$

или  $N_m > N_n$  (когда  $g_m = g_n$ ), тогда бы  $\alpha_{\omega} < 0$  и в результате получили бы усиление мощности излучения при его прохождении через среду (см рис. 4.4 Б). На основе идеи создания инверсной заселенности в 1953 году были сформулированы основные принципы мазеров и лазеров.

Главная задача, которую было необходимо решить для усиления мощности излучения, – это создание инверсной заселенности.

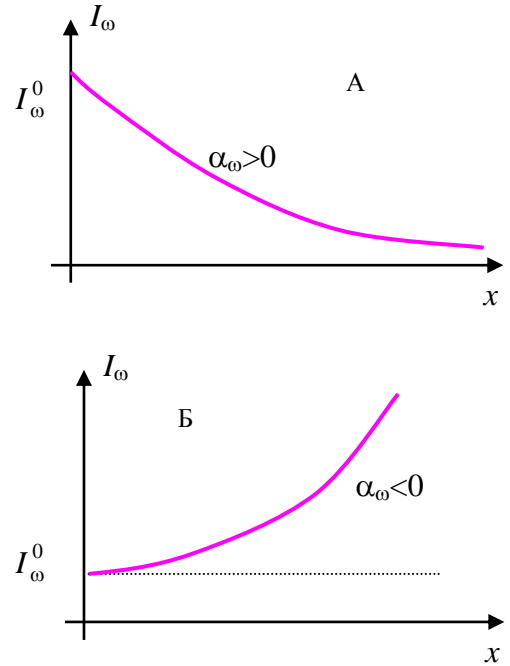


Рис. 4.4.

Примечание 1. Пьер Бугер, французский физик, 1698–1758;  
Иоганн Генрих Ламберт, немецкий физик, 1728–1777

### 1.4.3. Принципы работы лазера.

Создание лазеров стало возможным лишь после того, как нашли способ осуществления инверсной заселенности. Основные принципы работы микроволновых и оптических усилителей были сформулированы А.М. Прохоровым, Н.Г. Басовым и Ч.Х. Таунсом в 1953 году.

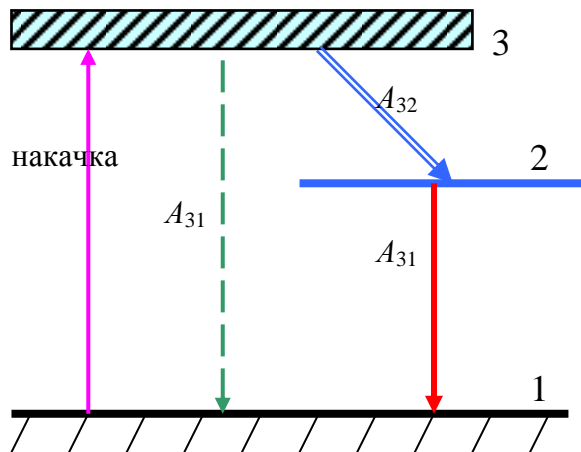


Рис. 4.5.

В 1954 году были созданы *мазеры* – усилители микроволн. Позже были созданы *лазеры* – оптические квантовые генераторы – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Создание лазеров стало возможным после осуществления и создания инверсной заселенности.

Наиболее простая схема создания инверсной заселенности – это использование трехуровневых систем с определенными свойствами. Накачкой, которая создается с помощью дополнительного излучения большой мощности, разрядов, столкновений и того подобного, создается возбуждение системы – переход из основного состояния 1 в состояние 3 (см рис. 4.5). Уровень 3 подбирается таким, чтобы он имел большую энергетическую ширину, т.е. имел бы малое время

жизни и быстро распадался. При этом возбужденная система спонтанно переходит на уровень 1 (обратно в основное состояние) и на другой возбужденный уровень 2. Причем система подобрана таким образом, чтобы вероятность  $A_{32}$  перехода на уровень 2 была достаточно большая. Уровень 2 подбирается долгоживущим, так что за время накачки на нем накапливается значительное число возбуждений и его заселенность становится выше заселенности основного состояния. Так создается инверсная заселенность.

Среда с инверсной заселенностью, способная усилить проходящий через нее световой поток, называется *активной*. Активная среда помещается между 2-мя зеркалами, чтобы обеспечить многократное прохождение излучения через активную среду. Причем с одной стороны стоит зеркало с максимально возможным коэффициентом отражения, другое зеркало подбирается полупрозрачным, но так, чтобы с одной стороны обеспечить выход лазерного излучения, а с другой – продолжить прохождение излучения в среде для усиления индуцированного излучения. Важно соблюдение точной пропорции между пройденным и отраженным излучением для поддержания генерации. Такая система называется открытым резонатором (напоминает интерферометр Фабри - Перо). Такой резонатор не только усиливает, но *также коллимирует и монохроматизирует излучение*. Коллимация происходит за счет усиления лучей, распространяющихся вдоль оси лазера. Лучи других направлений уходят или поглощаются боковыми стенками в результате отражений. Иногда для уменьшения потерь в лазерах ставят длиннофокусные сферические зеркала.

Накачка лазера бывает различной как по механизму, так и по длительности. По длительности она подразделяется на *непрерывную и импульсную*, отсюда и излучение лазера бывает непрерывным и импульсным. В импульсном режиме можно создать большие мощности излучения.

Перечислим основные свойства лазерного излучения.

- 1). Высокая монохроматичность ( $\Delta\lambda \leq 0.1 \text{ \AA}$ ).
- 2). Высокая временная и пространственная когерентность.
- 3). Высокая плотность излучения (интенсивность).
- 4). Малая расходимость пучка.
- 5). Высокая степень поляризации пучка.

В настоящее время имеется громадное разнообразие лазеров, которые отличаются активными средами, мощностями, режимами работы, накачкой и т.д. Рассмотрим некоторые типы лазеров.

1). *Рубиновые лазеры* (1960 г.). В качестве рабочего вещества – рубин ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Красноватый цвет рубина из-за ионов хрома, которые замещают в решетке ионы алюминия. Схема задействованных уровней аналогична трехуровневой системе (см рис. 4.6), однако, при этом используются две полосы поглощения: зеленая и голубая. Наряду с ними имеются 2 узких уровня, при переходе с которых испускается красный свет с длинами волн  $\lambda = 694.3 \text{ нм}$  и  $\lambda = 692.8 \text{ нм}$ . Более интенсивная линия с длиной волны  $\lambda = 694.3 \text{ нм}$ , которая и обычно и усиливается при работе лазера. Однако, генерация возможна на обоих переходах и излучение лазера зависит от выбранных зеркал.

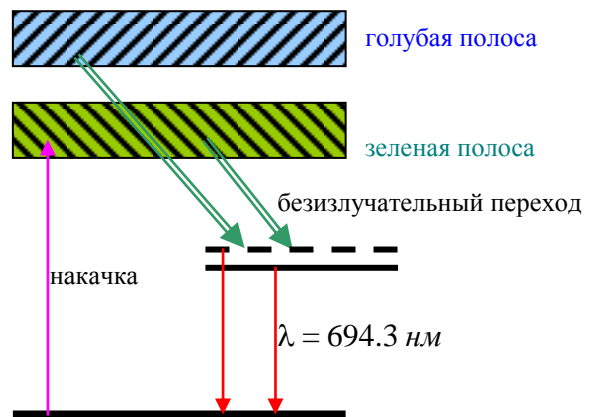


Рис. 4.6.

Накачка осуществляется при вспышке неоновой лампы при прохождении через нее импульса тока, нагревающего газ до  $\geq 1000\text{K}$ . Непрерывная накачка в этом случае не проходит, поэтому рубиновый лазер – импульсный лазер.

Кристалл рубина вырезается цилиндрической формы определенного размера: длиной 5 см и диаметром

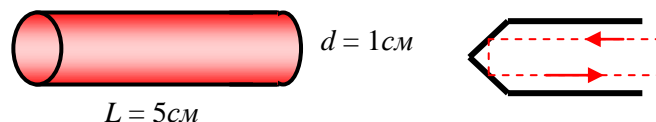


Рис. 4.7.

1 см (см рис. 4.7). С одной стороны кристалла устанавливается зеркало или срез для обеспечения полного внутреннего отражения.

2). *Гелий-неоновый лазер*. Активная среда – газовая смесь гелия He и неона Ne. Генерация осуществляется за счет переходов между энергетическими уровнями Ne. Гелий играет роль посредника, через атомы которого энергия передается атомам Ne для создания инверсной заселенности. Ток пропускается через He – Ne смесь (см рис.4.8), при этом атомы He возбуждаются в метастабильные (долгоживущие) состояния  $2^3S$  и  $2^2S$ . В результате столкновений с атомами Ne они передают им энергию и возбуждают  $3^3S$  и  $2^3S$  уровни, откуда происходит генерация излучения. Неон может давать 130 переходов, наиболее интенсивные переходы дают инфракрасную линию и линию в видимом диапазоне. Это лазеры непрерывного действия.

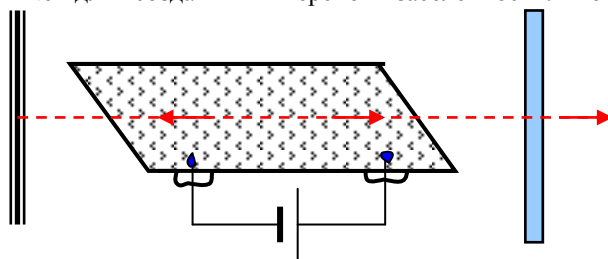


Рис. 4.8.

3). *Лазеры на красителях*. Активная среда – сложные молекулы с сильно выраженными колебательными уровнями энергии. При этом эти энергетические уровни очень широкие, поэтому энергию можно менять почти непрерывно в пределах энергетической полосы (рис. 4.9). Накачка происходит с помощью газоразрядной лампы.

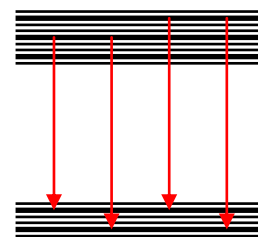


Рис. 4.9.

4). *Твердотельные*, в частности *полупроводниковые*, лазеры. Создаются на люминесцирующих средах (рубины, стекла, активированные Nd) и гетероструктурах. Гетеролазеры работают в импульсном и непрерывном режимах. Накачка происходит с помощью инжекции электронов через гетеропереход или электронным пучком.

5). *Лазеры на свободных электронах*. Активная среда – поток релятивистских электронов, колеблющихся под действием внешнего электрического или магнитного поля.

Лазеры в рентгеновском и гамма диапазонах широко обсуждаются в литературе.

---

Примечание 2. Александр Михайлович Прохоров, советский физик, 1916–2004, окончил Ленинградский университет;

Николай Геннадиевич Басов, советский физик, 1922;

Чарльз Хард Таунс, американский физик, 1915. Все получили Нобелевскую премию за фундаментальные исследования в области квантовой радиофизики в 1964 году

---