

# Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

Лекция 3:

## Взаимодействие излучения с атомными системами

**В.М. Шандаров**

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

# Энергетические уровни

- Энергия свободной частицы, как известно, может принимать любые значения. При движении же частицы в некоторой системе, как мы видели, ее энергия может принимать только дискретные значения, т.е. квантуется. Возможные дискретные значения энергии квантовой системы (система микрочастиц, атомы, молекулы и т.д.), как уже отмечалось, называют энергетическими уровнями. В свободных атомах квантуется энергия электронов и имеется система энергетических уровней электронов, или система электронных уровней атома.

# Энергетические уровни

- Если рассматривать более крупные квантовые системы – молекулы, то можно отметить следующие движения частиц:
- А) движение электронов в атоме;
- Б) колебания атомов в молекуле;
- В) *вращение и поступательное движение молекул.*

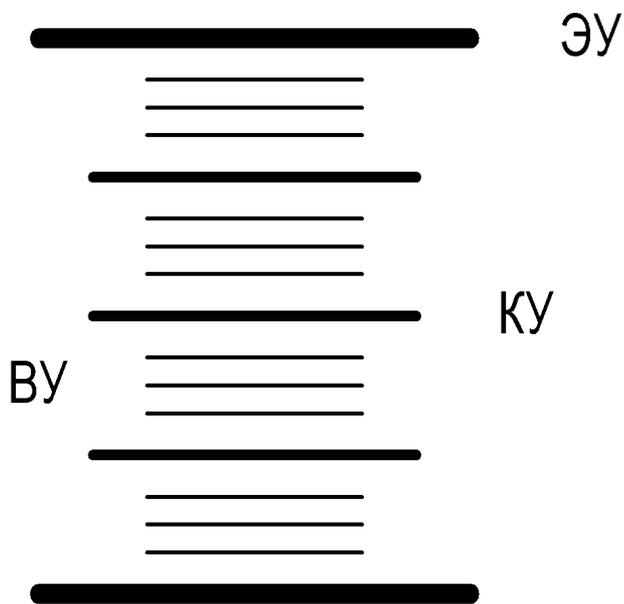
---

# Энергетические уровни

Из этих видов движения квантуется энергия, связанная с движением электронов внутри атома, колебаниями атомов в молекулах и вращательным движением молекул.

В результате квантования образуется система энергетических уровней свободной молекулы

# Энергетические уровни



Основой системы являются электронные уровни, которые отстоят друг от друга на 1 – 10 эВ. Между электронными уровнями (ЭУ) располагаются колебательные уровни атомов (КУ) с расстоянием  $\sim 0,1$  эВ. Между колебательными уровнями находятся вращательные уровни (ВУ) с расстоянием между ними 10–3 эВ и менее.

# Энергетические уровни

- Переходы между электронными уровнями соответствуют излучению в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, между колебательными уровнями – инфракрасному диапазону, а между вращательными уровнями – СВЧ диапазону. Такой вид имеет система энергетических уровней свободных и слабо связанных молекул и атомов.

# Энергетические уровни

- При рассмотрении систем энергетических уровней частицы самый нижний уровень, соответствующий минимальной внутренней энергии, называют основным. Остальные энергетические уровни, соответствующие более высокой внутренней энергии частицы, называют возбужденными. Когда говорят, что частица перешла с одного энергетического уровня на другой, то имеется в виду, что внутренняя энергия частицы изменилась на величину, равную разности энергий данных энергетических уровней. При переходе на более высокий уровень частица поглощает энергию, а при переходе на более низкий – отдает.

# Энергетические уровни

- Переходы могут быть излучательными (с поглощением или излучением кванта энергии) или безызлучательными. В случае безызлучательных переходов с уменьшением энергии, квант энергии выделяется в виде тепла в среде. При безызлучательных переходах с увеличением энергии частица получает эту энергию не от электромагнитного поля, а в результате взаимодействия с другими частицами либо с решеткой в случае твердого тела.
- *Состояние, из которого запрещены все излучательные переходы в более низкие энергетические состояния, называется метастабильным. Такие состояния играют очень важную роль в квантовых приборах.*

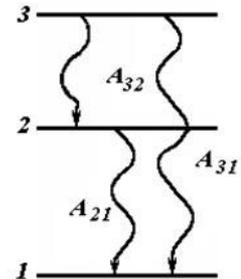
# Квантовые переходы

- Спонтанные переходы.
- Это самопроизвольные квантовые переходы частицы из верхнего энергетического состояния в одно из нижних состояний. Спонтанные переходы могут сопровождаться электромагнитным излучением, частота которого определяется из постулата Бора

$$h\omega_{ji} = E_j - E_i$$

$$\omega_{ji} = \frac{E_j - E_i}{h}$$

- эта частота называется частотой квантового перехода



# Квантовые переходы

- Число частиц с одинаковой энергией в единице объема называется населенностью соответствующего энергетического уровня.
- Рассмотрим двухуровневую систему и положим  $i=1$ ;  $j=2$ . Обозначим населенности данных уровней как  $N_1$  и  $N_2$ . При спонтанных переходах происходит уменьшение числа частиц  $N_2$  на верхнем уровне и увеличение их числа  $N_1$  на нижнем уровне. Уменьшение населенности верхнего уровня за время  $dt$  пропорционально  $N_2$  и  $dt$ :

$$\Delta N_2 = -A_{21} N_2 \cdot dt$$

# Спонтанные переходы

- постоянную  $A_{21}$  называют коэффициентом Эйнштейна для спонтанных переходов. Этот коэффициент определяет вероятность спонтанного перехода в 1с. Решение (5.69) имеет вид:

$$N_2(t) = N_2(0) \cdot \exp(-A_{21}t)$$

- где  $N_2(0)$  – населенность верхнего уровня в момент  $t=0$ .
- Из этого следует, что через время  $t=1/A_{21}$  населенность  $N_2$  уменьшится в  $e$  раз ( $e=2,718$ ) по сравнению с  $N_2(0)$ .

# Спонтанные переходы

- Величина  $\tau = 1/A_{21}$  характеризует время жизни частицы в возбужденном состоянии и называется временем жизни на уровне. Коэффициент Эйнштейна  $A_{21}$  определяет среднее число спонтанных переходов в единице объема в 1 с., т.е. среднее число частиц, совершивших самопроизвольный переход из верхнего состояния в нижнее. Он имеет размерность и может быть любым по величине в отличие от математической вероятности, изменяющейся от 0 до 1.

# Спонтанные переходы

- Число спонтанных переходов в единице объема за 1 с.:  
$$n_{21} = A_{21} N_2$$
- С учетом при спонтанных переходах в системе за 1 с выделяется энергия:

$$P_{21} = n_{21} \cdot h\omega_{21} = A_{21} \cdot N_2 \cdot h\omega_{21}$$

- Спонтанные переходы случайны, что означает неодновременность и независимость актов излучения при таких переходах. Фазы, направления распространения, поляризация и частота электромагнитных волн при этом не совпадают и спонтанное излучение не когерентно.

# Спонтанные переходы

- В системе частиц с несколькими энергетическими уровнями возможны спонтанные переходы с данного уровня на все нижние уровни. Полная вероятность  $A_j$  спонтанного перехода с уровня  $j$  на нижние уровни  $i$  равна сумме вероятностей отдельных переходов  $A_{ji}$ :

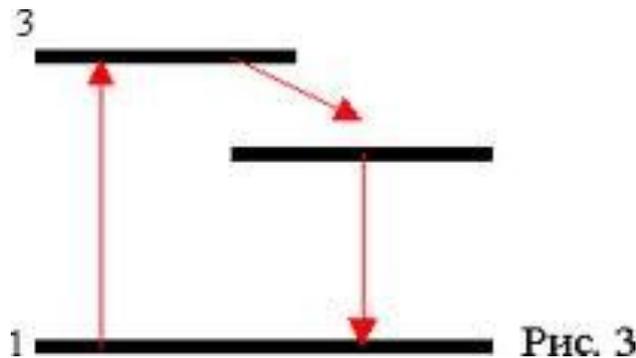
$$A_j = \sum_{i=1}^{j-1} A_{ji} = A_{j1} + A_{j2} + \dots + A_{j(j-1)}$$

- Время жизни частицы на уровне  $j$  при этом определяется соотношением:

$$\tau_j = \frac{1}{A_j}$$

# Индукцированные переходы

- Это квантовые переходы частиц под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает или близка к частоте перехода. При этом возможен как переход с верхнего уровня на нижний, так и с нижнего на верхний.



# Индуцированные переходы

- *В первом случае происходит вынужденное испускание кванта с энергией . Особенность вынужденного испускания заключается в полной идентичности появившегося фотона фотону внешнего поля. Вынужденное излучение имеет ту же частоту, фазу, направление распространения и поляризацию, что и вынуждающее излучение.*

# Индукцированные переходы

- Таким образом, начальная энергия поля с частотой  $\omega$  может увеличиться, что указывает на возможность реализации квантовых усилителей и генераторов. Необходимо отметить, что на вынужденный переход с излучением не затрачивается энергия внешнего поля. Напротив, для перевода частицы в возбужденное состояние  $2$  необходима энергия внешнего поля.

# Индукцированные переходы

- Вынужденные переходы, как и спонтанные, имеют статистический характер. Для их описания также вводятся вероятностные коэффициенты:
- А)  $W_{21}$  – вероятность вынужденного перехода сверху вниз.
- Б)  $W_{12}$  – *вероятность такого перехода снизу вверх.*

# Индуцированные переходы

- Эти коэффициенты также определяют вероятность перехода частицы с одного уровня на другой за одну секунду. Вероятности индуцированных переходов пропорциональны объемной плотности энергии внешнего поля  $U\omega$  в единичном спектральном интервале на частоте перехода и определяются соотношениями:

$$W_{21} = B_{21}U_{\omega} \quad W_{12} = B_{12}U_{\omega}$$

- Здесь  $B_{21}$  и  $B_{12}$  – коэффициенты Эйнштейна для вынужденных переходов с излучением и поглощением энергии, соответственно.

# Индукцированные переходы

- Они имеют смысл вероятности вынужденных переходов в 1 с при единичной объемной плотности энергии внешнего поля

$$U_v = \frac{1 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3}}{c}$$

- Число вынужденных переходов сверху вниз с излучением энергии в единицу времени в единице объема пропорционально величине  $W_{21}$  и населенности  $N_2$ :

$$n_{21(B)} = W_{21} N_2 = B_{21} U_{\omega} N_2$$

# Индуцированные переходы

- Аналогично, число вынужденных переходов с поглощением энергии в единицу времени в единичном объеме определяется соотношением:

$$n_{12(B)} = W_{12} N_1 = B_{12} U_{\omega} N_1$$

- Поскольку в квантовых системах при наличии внешнего электромагнитного поля резонансной частоты происходят вынужденные переходы как с излучением, так и с поглощением энергии, то в таких системах возможно как ослабление, так и усиление внешнего поля.

# Соотношения между коэффициентами Эйнштейна

- Эйнштейн получил соотношения связи между коэффициентами  $A_{ij}$  и  $B_{ij}$ , рассматривая систему с двумя уровнями в состоянии термодинамического равновесия. При этом число излученных квантов в системе должно быть равно числу поглощенных, т.е. должно выполняться условие  $n_2 A_{21} = n_1 B_{12}$ .
- В состоянии термодинамического равновесия в системе имеется равновесная плотность поля излучения  $U_\omega$ , определяющая число вынужденных переходов.

# Соотношения между коэффициентами Эйнштейна

- Полное число переходов сверху вниз  $n_{21}$ :

$$n_{21} = n_{21(c)} + n_{21(B)} = (A_{21} + B_{21}U_{\omega})N_2$$

- Число переходов  $n_{12}$  с нижнего уровня на верхний (только вынужденные):

$$n_{12} = n_{12(B)} = B_{12}U_{\omega}N_1$$

- Приравнивая  $n_{21}$  и  $n_{12}$ , получим:

$$B_{12}U_{\omega}N_1 = (A_{21} + B_{21}U_{\omega})N_2$$

# Соотношения между коэффициентами Эйнштейна

- Отсюда находим  $U_\omega$ :

$$U_\omega = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{B_{12}N_1}{B_{21}N_2} - 1}$$

- В состоянии термодинамического равновесия соотношение населенностей уровней определяется законом Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \cdot \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

где  $g_2, g_1$  – статистические веса энергетических уровней;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

# Соотношения между коэффициентами Эйнштейна

- В случае отсутствия вырождения энергетических уровней  $g_2=g_1=1$ , тогда получаем:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

- Подставляя (5.83) в (5.81), с учетом равенства , получим:

$$U_\nu = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \cdot \exp\left(\frac{h\omega_{21}}{kT}\right) - 1}$$

# Соотношения между коэффициентами Эйнштейна

- Эйнштейн постулировал, что равновесная спектральная плотность энергии должна быть равна ее значению, найденному по формуле Планка для равновесного излучения абсолютно черного тела:

$$U_{\nu} = \frac{\frac{8\pi\nu^2}{c^3}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

# Соотношения между коэффициентами Эйнштейна

- Отсюда следует:
- $B_{12}=B_{21}$

$$A_{21} = \frac{8\pi h\nu_{21}^3}{c^3} \cdot B_{21}$$

- Необходимо отметить сильную частотную зависимость коэффициента Эйнштейна по спонтанным переходам  $A_{21} \sim \nu^3$ , которая указывает на существенную роль спонтанного излучения в оптическом диапазоне.