

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 03.09.2021 11:38:59

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d79e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О. Г. Локтионова

«21» 09 2021 г.



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Методические указания  
по выполнению практической работы  
для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02  
«Информационная безопасность телекоммуникационных систем»  
по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника»

Курск 2019

УДК 004.716

Составитель: А. А. Гуламов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор В.Г. Андронов

Взаимодействие излучения с веществом: методические указания по подготовке и проведению практического занятия / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Токарева А. А. Гуламов. - Курск, 2019. – с.13: ил. 2, табл. 1. – Библиогр.: с.13.

Методические указания по выполнению практической работы содержат теоретические сведения о физических основах взаимодействия излучения с веществом.

Полученные знания в результате проведения занятия дают возможность сформировать целостную картину представления о физических основах взаимодействия излучения с веществом, о процессах взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Квантовая и оптическая электроника», утвержденной на заседании кафедры КПиСС по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника», а также для студентов других направлений подготовки в области информационных технологий и систем связи.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано печать 21.01.19. Формат 60x841/16.

Усл. печ. л. 04. Уч.-изд. л. 06. Тираж 100 экз. Заказ. 14 Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

1 Цели работы	- 4
2 Краткие теоретические сведения	- 4
2.1 Физические основы взаимодействия излучения с веществом	- 4
2.2 Форма и ширина спектральной линии	- 9
3 Контрольные вопросы	- 12
4 Задачи	- 12
5 Список литературы	- 13

## 1 Цели работы

Получение навыков и умений в освоении дисциплины «Квантовая и оптическая электроника», в вопросах изучения физических основ взаимодействия излучения с веществом, процессов взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения.

## 2 Краткие теоретические сведения

### 2.1 Физические основы взаимодействия излучения с веществом

Существует три возможных процесса взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения, которые схематически показаны на рис. 1.

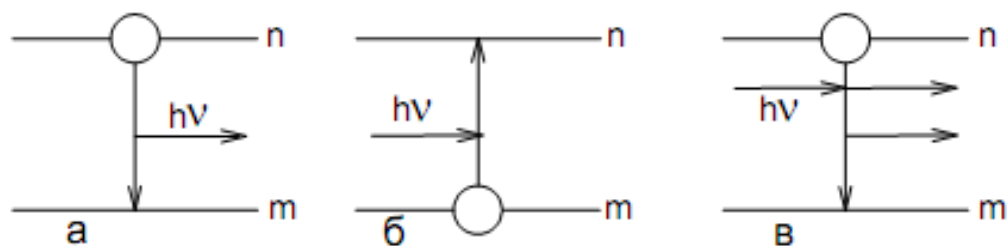


Рисунок - 1 Квантовые переходы при взаимодействии с фотоном:  
а – спонтанный переход с испусканием фотона; б – вынужденный переход с поглощением фотона; в – вынужденный переход с испусканием фотона

Рассмотрим переходы частицы из одного состояния в другое с выделением или поглощением энергии электромагнитного поля. Возбужденная частица в произвольный момент времени может самопроизвольно перейти в более низкое энергетическое состояние, излучив при этом квант света. Такое излучение называется спонтанным.

Скорость спонтанного перехода с уровня  $n$  на уровень  $m$  определяется выражением.

$$\frac{dN_n}{dt} = A_{nm}N_n, \quad (1)$$

где  $N_n$  – концентрация частиц на уровне  $n$ . Коэффициент  $A_{nm}$  есть вероятность перехода или коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, [ $\text{с}^{-1}$ ]. Величина, обратная  $A_{nm}$ , называется спонтанным временем жизни.

Значение коэффициента Эйнштейна для спонтанных переходов в оптическом диапазоне может изменяться от  $10^8 \text{ с}^{-1}$  для разрешенных переходов до  $1 \text{ с}^{-1}$  для запрещенных переходов.

Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы излучают независимо и несинхронно. Поэтому спонтанное излучение ненаправленно, некогерентно, неполяризовано и немонохроматично. Такое естественное излучение испускают все обычные источники света.

Другим оптическим процессом является поглощение излучения частицей, переходящей в результате этого в возбужденное состояние. Скорость поглощения

$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn}\rho(\nu)N_m, \quad (2)$$

где  $B_{mn}$  – коэффициент Эйнштейна для вынужденного поглощения,  $\rho(\nu)$  – спектральная плотность излучения,  $N_m$  – концентрация частиц на уровне  $m$ .

Однако эти два процесса не объясняют всех закономерностей взаимодействия излучения со средой. При взаимодействии возбужденной частицы с фотоном возможен переход частицы в состояние с меньшей энергией – при этом излучается дополнительный фотон. Этот процесс носит название вынужденного или стимулированного излучения. Скорость этого процесса:

$$\frac{dN_n}{dt} = -B_{nm}\rho(\nu)N_n, \quad (3)$$

где  $B_{nm}$  – коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения,  $P(\nu)$  – спектральная плотность излучения,  $N_n$  – концентрация частиц на уровне  $n$ . Произведение  $B \cdot \rho(\nu)$  имеет размерность, обратную времени. Следует отметить, что  $B_{nm} = B_{mn}$  с точностью до постоянного множителя. Связь между коэффициентами спонтанного и вынужденного испускания определяется соотношением:

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (4)$$

Стимулированное излучение является процессом, составляющим физическую основу работы ОКГ. Существует весьма интересная особенность стимулированного излучения – вторичный фотон неотличим от первичного, стимулирующего фотона. Оба фотона характеризуются одинаковыми параметрами: частотой, фазой, импульсом и поляризацией. В инверсной среде, используемой в ОКГ, стимулированное излучение становится процессом, который определяет механизм размножения фотонов.

Предположим, что на систему, содержащую частицы  $m$  и  $n$ , падает электромагнитная волна с частотой  $\nu$  и со спектральной плотностью  $\rho(\nu)$ . При этом единицей объема среды в процессе вынужденного поглощения поглотится мощность, равная:

$$W_n = h\nu B_{nm} \rho(\nu) N_m \quad (5)$$

В то же время в процессе вынужденного излучения выделится мощность:

$$W_{изл} = h\nu B_{nm} \rho(\nu) N_n \quad (6)$$

Разность этих мощностей представляет собой мощность излучения, вышедшую из активной среды:

$$W_{изл} - W_n = h\nu B_{nm} \rho(\nu) [N_n - N_m]. \quad (7)$$

В уравнении 7 учтено, что  $B_{mn} = B_{nm}$ . Очевидно, что если  $W_{изл}$  больше  $W_n$ , то мощность волны будет увеличиваться по мере прохождения среды. В противном случае среда поглощает волну.

Таким образом, при выполнении условия  $N_n$  больше  $N_m$ , то есть при наличии в системе инверсной заселенности уровней, можно получить оптический квантовый усилитель света. Инверсия заселенностей является необходимым, но недостаточным условием для получения усиления в данной среде. Необходимо так же, чтобы усиление за счет процессов вынужденного излучения превышало все возможные потери.

Рассмотрим подробнее вопрос о коэффициенте усиления системы. Изменение интенсивности излучения при прохождении оптически активной среды описывается уравнением:

$$dI_\nu = -x_\nu I_\nu dx, \quad (8)$$

представляющим собой закон Бугера в дифференциальной форме. Здесь  $x_\nu$  – показатель поглощения.

Если в рассматриваемой среде существует инверсная заселенность, то коэффициент поглощения меньше нуля, то есть волна не затухает, а усиливается. В этом случае о среде с инверсной заселенностью можно говорить как о среде с отрицательным коэффициентом поглощения.

Установим связь между коэффициентом поглощения и инверсной заселенностью уровней. Перепишем уравнение (1.8) в виде:

$$x_\nu = -\frac{dI_\nu}{I_\nu dx}. \quad (9)$$

Очевидно, что смысл  $x_\nu$  – это относительное приращение потока энергии на единице пути. Энергия, выделяемая в единице объема в единицу времени, определяется уравнением (1.9) и представляет собой производную интенсивности излучения по расстоянию. С учетом изложенного можно записать:

$$x_\nu = -\frac{h\nu B_{nm}(N_n - N_m)\rho(\nu)}{\rho(\nu)c},$$

$$x_\nu = -\frac{h\nu B_{nm}(N_n - N_m)}{c}. \quad (10)$$

Для лазерных сред отрицательный показатель поглощения получил название показателя усиления  $\alpha_\nu$ . Он непосредственно характеризует усилительные свойства среды.

$$\alpha_\nu = -x_\nu$$

При распространении волны в инверсной среде часть ее интенсивности теряется за счет различных потерь. Этот процесс так же можно описать уравнением Бугера:

$$dI_\nu = -x_n I_\nu dx, \quad (11)$$

где  $x_n$  – показатель потерь. Учитывая потери в среде и усилительные ее свойства, окончательное уравнение изменения интенсивности волны можно представить в виде

$$dI_\nu = (\alpha_\nu - x_n) I_\nu dx. \quad (12)$$

Очевидно, что усиление будет иметь место при  $-\alpha_\nu \gg x_n$  то есть необходимо иметь некоторую критическую или пороговую инверсную заселенность, определяемую выражением:

$$x_n = \frac{h\nu B_{nm} \Delta N_{nop}}{c}$$

$$\Delta N_{nop} = (N_n - N_m). \quad (13)$$

Усилительные свойства среды можно улучшить, если использовать положительную обратную связь, то есть возвращать часть сигнала в активную среду, обеспечивая многократное прохождение его. При этом достигается гораздо большее усиление. Если усиле-



ние существенно перекрывает потери среды и системы обратной связи, то произойдет самовозбуждение усилителя, начнется генерация излучения.

Интегральное усиление сигнала в инверсной среде характеризуется коэффициентом усиления, представляющим отношение величины выходного сигнала к входному:

$$K = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \quad (14)$$

В случае, когда усиление значительно, указывают коэффициент усиления в децибелах:

$$K = 10 \lg \left( \frac{P_{вых}}{P_{вх}} \right), \text{ дБ}. \quad (15)$$

Мы рассмотрели влияние инверсной среды на характеристики проходящего излучения. Однако изменения происходят и в инверсной среде. Увеличение плотности излучения в среде вызовет уменьшение плотности инверсии, так как баланс процессов изменится в сторону обеднения верхнего уровня и дополнительного заселения нижнего уровня. Этот процесс называется насыщением усиления и определяет нелинейный характер усиления излучения инверсной средой.

## 2.2 Форма и ширина спектральной линии

В предыдущем рассмотрении не учитывалась ширина спектральной линии. Но любая спектральная линия имеет конечную ширину, связанную с вероятностями переходов. Поэтому вопрос о форме и ширине спектральной линии целесообразно рассмотреть подробнее.

Энергетическому переходу между двумя бесконечно узкими энергетическими уровнями должна соответствовать бесконечно узкая спектральная линия поглощения или излучения на строго фиксированной частоте. Реально такая идеализированная монохрома-

тическая волна существовать не может, поскольку уровни энергии имеют конечную ширину. Поэтому излучение происходит в некотором интервале частот около  $\nu_0$ . На этой частоте мощность излучения максимальна и убывает на частотах, больших или меньших чем  $\nu_0$ . Частотный интервал, в пределах которого интенсивность убывает вдвое по сравнению с максимальным значением, называется шириной спектральной линии  $\Delta\nu_N$ . Ширина спектральной линии, определяемая спонтанными переходами, называется естественной шириной, которая прямо пропорциональна вероятности спонтанного перехода:

$$\Delta\nu_N = \frac{A_{nm}}{2\pi} = \frac{32\pi^3\nu_{nm}^3}{3hc^3g_m} |D_{nm}|^2, \quad (16)$$

где  $g_m$  – кратность вырождения уровня  $|D_{nm}|$  – матричный элемент дипольного момента перехода.

Форма спектральной линии с естественной шириной описывается функцией Лоренца, которую иногда называют формфактором:

$$F_\nu = \frac{\Delta\nu_N}{\pi(\nu - \nu_0)^2 \Delta\nu_N^2} \quad (17)$$

$$\text{Эта функция нормируется: } \int_{-\infty}^{+\infty} F_\nu d\nu = 1 \quad (18)$$

С естественной шириной спектральной линии тесно связано время жизни частицы в возбужденном состоянии. Как уже отмечалось, время жизни есть величина, обратная вероятности перехода. Время жизни, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, определяет и ширину энергетического уровня

$$\Delta E_{nm} = \frac{h}{2\pi\tau_{nm}} \quad (19)$$

Наиболее широкими оказываются уровни с малым временем жизни и большой вероятностью перехода. Соотношение ширины линии и ширины перехода наглядно иллюстрируется рис. 2

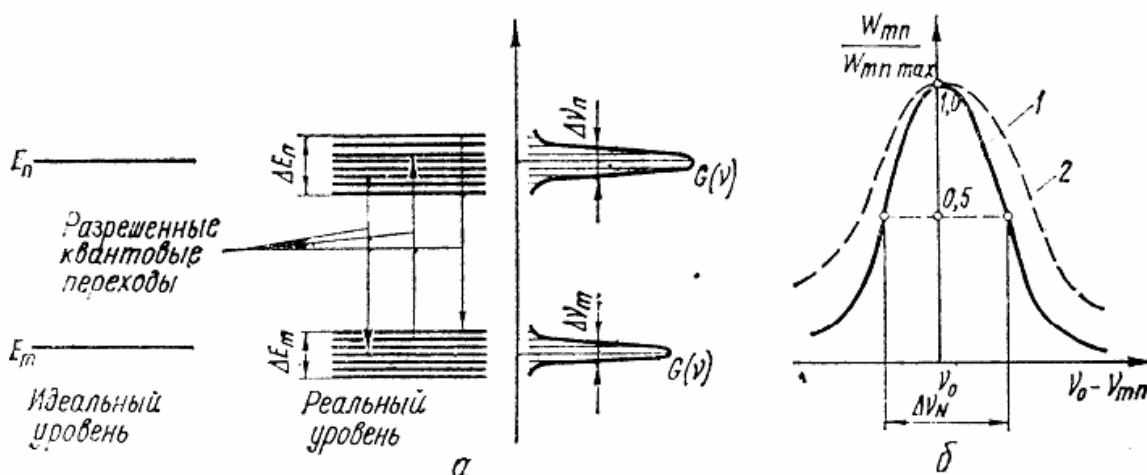


Рисунок -2. Представление реального и идеального энергетического уровня.

Форму спектральной линии можно выразить и как функцию длины волны:

$$\Delta\lambda = 2\pi c \frac{\Delta\nu}{\nu^2} \quad (20)$$

Для классического осциллятора естественная ширина линии, выраженная в длинах волн и называемая также радиационной шириной, является универсальной постоянной:

$$\Delta\lambda = \frac{e^2}{3\varepsilon_0 c^2 m} = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м.} \quad (21)$$

В реальных условиях существует ряд факторов, приводящих к увеличению ширины спектральной линии по сравнению с естественной шириной. Рассмотрим некоторые из них.

### 3 Контрольные вопросы

1. В чем отличия между спонтанным и вынужденным излучением?
2. Как связаны друг с другом коэффициенты спонтанного и вынужденного излучения и поглощения?
3. Что называется инверсной населенностью и почему она необходима для получения усиления в квантовой системе?
4. Какая ширина спектральной линии называется естественной?

### 4 Задачи

1. Определить энергию кванта света, имеющего длину волны 632,8 нм; 1,06 мкм; 10,6 мкм; 228 нм; 330 нм.
2. Лазер мощностью 1 мВт излучает свет с длиной волны 632,8 нм. Вычислить поток квантов излучения.
3. Коэффициент поглощения излучения в активной среде составляет  $0,1 \text{ см}^{-1}$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность излучения при прохождении пути  $l$  (10 см, 100 см).
4. Сечение поглощения излучения с длиной волны 330 нм хлором составляет  $2 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность при прохождении расстояния 1 м.
5. Определить коэффициент и сечение поглощения излучения, если сигнал при прохождении расстояния 20 см ослабляется вдвое.
6. Вычислите коэффициент вынужденного излучения  $B$ , если коэффициент спонтанного излучения составляет а)  $10^8 \text{ с}^{-1}$ , б)  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , в)  $10^4 \text{ с}^{-1}$ .
7. Во сколько раз усиливается излучение, если коэффициент усиления составляет а) 0,1 дБ, б) 1 дБ, в) 10 дБ.
8. Интегральный коэффициент усиления системы составляет 10 дБ, выходная мощность 1 мВт. Определить входную мощность.
9. Вероятность перехода  $A_{mn}$  составляет  $2 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Определить время жизни частицы в возбужденном состоянии и ширину энергетического уровня.
10. Вычислите естественную ширину спектральной линии и ширину энергетического уровня, если коэффициент спонтанного излучения  $A$  составляет а)  $10^8 \text{ с}^{-1}$ , б)  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , в)  $10^4 \text{ с}^{-1}$ .

## 5 Список литературы

1. Квантовая и оптическая электроника [Текст]: учебное пособие / Г. Л. Киселев. - Изд. 2-е, испр. и доп. - СПб. [и др.]: Лань, 2011. - 320 с. : ил. - ISBN 978-5-8114-11 14-6.

2. Квантовая и оптическая электроника [Электронный ресурс]: учебное пособие / Л. И. Шангина. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радио-электроники, 2012. - 303 с.

3. Дудкин, В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение: учеб. пособие для вузов. - М.: Техносфера, 2006. - 432 с. – ISBN 5-94836-076-8

4. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника: Учеб. Для вузов/ А.Н. Пихтин.- М: Высш. Шк., 2001.- 573 с.: ил. ISBN 5-06-002703-1

5. Светцов, В.И. Оптическая и квантовая электроника: учеб. пособие / В.И. Светцов; Иван. гос. хим.-техн. ун-т; - 2-е изд., испр. и доп. - Иваново, 2010. 196 с. ISBN 978-5-9616-0386-6