

## Литература

1. Загрязнение воздуха внутри жилых помещений и его влияние на здоровье. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>. – Дата доступа: 05.07.2021.

2. Стандарты ИСО помогут дышать легче. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/news/ref2397.html>. – Дата доступа: 2.07.2021.

3. Isolation and quantitative analysis of road dust nanoparticles / M. S. Ermolin [et al.] // J. Analyt. Chem. – 2017. – Vol. 72, № 5. – P. 520–532.

4. Ultrafine particle counter using a MEMS-based particle processing chip / H.-L. Kim [et al.] // 28<sup>th</sup> IEEE

Intl. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – Estoril, Portugal, 18-22 Jan. – 2015. – P. 559–562.

5. Electrically tunable airborne particle classifier using a virtual impactor / Y. H. Kim [et al.] // IEEE 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS). – Wuhan, China, 13-17 Jan. – 2008. – P. 547–550.

6. Pesch, G. R. A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles / G. R. Pesch, F. Du // Electrophoresis – 2020. – Vol. 42, № 1–2. – P. 1–19.

7. Particle monitors and method(s) therefore : pat. US7551277B / M. T. Cole.

8. MEMS gratings and their applications / G. Zhou, [et al.] // Int. J. Optomechatronics. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 61–86.

УДК 535.234+621.373.826

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ И ПРИНЦИП ДЕТАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

Невдах В.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрены физические процессы, протекающие в термодинамически равновесной системе, состоящей из молекул, моделируемых осцилляторами Герца, и их теплового излучения. Показано, что все электромагнитное излучение, создаваемое осцилляторами Герца, является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы. На основе принципа детального равновесия проанализированы излучательные переходы, дающие вклад в тепловое излучение термодинамически равновесной системы, и показано, что они являются детерминированными процессами, которые протекают со скоростями, зависящими от температуры. Установлено, что свойства равновесного теплового излучения не зависят от температуры рассматриваемой системы.

**Ключевые слова:** излучательный переход, термодинамически равновесная система, принцип детального равновесия, скорость излучательного перехода

## RADIATIVE TRANSITIONS IN THERMODYNAMICALLY EQUILIBRIUM SYSTEMS AND THE PRINCIPLE OF DETAILED BALANCE

Nevdakh V.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** The physical processes occurring in a thermodynamically equilibrium system consisting of molecules modeled by Hertzian oscillators and their thermal radiation has been considered. All electromagnetic radiation generated by Hertzian oscillators is stimulated radiation, the properties of which are determined by the nature of the driving force has been shown. On the basis of the principle of detailed equilibrium, radiative transitions that contribute to the thermal radiation of a thermodynamically equilibrium system have been analyzed, and it has been shown that they are deterministic processes that proceed with rates depending on temperature. The properties of equilibrium thermal radiation do not depend on the temperature of the system under consideration has been found.

**Key words:** radiative transition, thermodynamically equilibrium system, detailed balance principle, radiative transition rate

*Адрес для переписки: Невдах В.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: nevdakh@bntu.by*

Принято считать, что простейшим источником электромагнитного излучения является осциллятор Герца – колеблющийся электрон. Энергия электромагнитного излучения, создаваемого колеблющимся электроном в единицу времени в одномерном случае колебаний вдоль оси  $X$ , дается известным выражением (см., например, [1]):

$$\delta \varepsilon = \frac{2e^2}{3c^3} \left| \frac{d^2 x}{dt^2} \right|^2, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света в вакууме.

Рассмотрим замкнутую систему, состоящую из резонаторов Герца и их теплового излучения,

находящуюся в состоянии термодинамического равновесия при температуре  $T$ . В такой системе будут происходить процессы взаимодействия резонаторов между собой вследствие их теплового движения, а также процессы взаимодействия резонаторов с тепловым излучением.

В соответствии с законом Ньютона, иметь отличное от нуля ускорение, т.е. колебаться, электрон может только под действием внешней вынуждающей силы. Без действия на электрон внешней силы он не может колебаться и создавать электромагнитное излучение. Поэтому процесс создания электромагнитного излучения осциллятором Герца всегда является вынужденным. Следовательно, все электромагнитное излучение, созданное колеблющимся электроном, является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы.

В рамках квантового подхода осцилляторам Герца можно сопоставить молекулы, имеющие дискретные энергетические уровни, в том числе и уровни  $m$  и  $n$  с энергиями  $E_m$  и  $E_n$  соответственно, причем  $E_m - E_n = h\nu$ . Рассмотрим систему, находящуюся в состоянии термодинамического равновесия при температуре  $T$ , и состоящую из молекул с плотностью  $N$  и теплового излучения с плотностью энергии  $\rho(\nu, T)$  (здесь и далее рассматривается плотность энергии теплового излучения в единичном спектральном интервале). В такой системе будет происходить как взаимодействие молекул между собой, возникающее в результате их теплового движения, так и их взаимодействие с тепловым излучением. Это взаимодействие приводит к тому, что плотности населенности  $N_m$  и  $N_n$  молекул на рассматриваемых энергетических уровнях подчиняются распределению Больцмана  $N_n = N_m e^{\frac{h\nu}{kT}}$ , а плотность энергии теплового излучения на частоте  $\nu$  остается постоянной величиной, т.е.  $\rho(\nu, T) = \text{const}$ .

Процессы, возможные в рассматриваемой равновесной системе, будем представлять в виде реакций, по аналогии с химическими реакциями.

Молекула, находящаяся в состоянии с энергией  $E_m$ , в результате взаимодействия с другой молекулой может перейти в состоянии с энергией  $E_n$ , а разность энергии уровней  $\Delta E = E_m - E_n$  может пойти на изменение кинетической энергии взаимодействующих молекул. Возможен и обратный процесс преобразования кинетической энергии взаимодействующих молекул в их внутреннюю энергию. В результате такого процесса молекула может перейти из состояния с энергией  $E_n$  в состоянии с энергией  $E_m$ . Это так называемые неоптические переходы, протекающие без участия электромагнитного излучения, и которые можно представить в виде:

$$M(E_m) + M' \leftrightarrow M(E_n) + M' + \Delta E. \quad (1)$$

Отметим, что если акты взаимодействия молекул, находящихся в определенном энергетическом состоянии, с другими молекулами или с тепловым излучением в термодинамически равновесной системе являются случайными событиями и поэтому имеют (носят) вероятностный характер, то состоявшиеся в результате такого взаимодействия переходы молекул в другие энергетические состояния – это детерминированные процессы, протекающие со своими скоростями.

Обозначим как  $D_{mn}N_m$  скорость прямого процесса в (1), а  $D_{nm}N_n$  – скорость обратного процесса, где  $D_{mn}$  и  $D_{nm}$  – константы скоростей этих процессов, соответственно.

Наряду с неоптическими переходами, взаимодействие молекул вследствие их теплового движения может стимулировать и оптические переходы, в ходе которых внутренняя энергия молекул преобразуется в энергию теплового излучения и, наоборот, энергия теплового излучения преобразуется во внутреннюю энергию молекул. Нет никаких физических ограничений на то, чтобы молекула, находящаяся в состоянии с энергией  $E_m$ , в результате взаимодействия с другой молекулой могла перейти в состояние с энергией  $E_n$ , уменьшив свою внутреннюю энергию на величину  $\Delta E = E_m - E_n$  и увеличив при этом энергию теплового излучения на величину  $h\nu = E_m - E_n$ . Обратным процессом в этом случае будет поглощение теплового излучения молекулой, находящейся в состоянии с энергией  $E_n$ . Эти процессы можно представить в виде:

$$M(E_m) + M \leftrightarrow M(E_n) + M + h\nu. \quad (2)$$

Излучение, появляющееся в результате прямого процесса (II), назовем вынужденным тепловым излучением. Обозначим  $A_{mn}^*N_m$  скорость прямого процесса, а  $B_{nm}^*\rho(\nu, T)N_n$  – скорость обратного процесса (2), где  $A_{mn}^*$  и  $B_{nm}^*\rho(\nu, T)$  – константы скоростей этих процессов, соответственно,  $B_{nm}^*$  – коэффициент пропорциональности.

Молекула, находящаяся в состоянии с энергией  $E_m$ , может также взаимодействовать с резонансным тепловым излучением на частоте  $\nu$  и в результате совершить переход в состояние с энергией  $E_n$ , уменьшив свою внутреннюю энергию на величину  $\Delta E = E_m - E_n$ , увеличив при этом энергию теплового излучения на величину  $h\nu = E_m - E_n$ . И в этом случае обратным процессом будет процесс поглощения теплового излучения молекулой, находящейся в состоянии с энергией  $E_n$ . Эти процессы можно представить в виде:

$$M(E_m) + \rho(\nu, T) \leftrightarrow M(E_n) + \rho(\nu, T) + h\nu. \quad (3)$$

Излучение, появляющееся в результате прямого процесса (III), назовем вынужденным резонансным тепловым излучением. Обозначим скорость прямо-

го процесса (3) как  $B_{mn}^* \rho(\nu, T) N_m$ , где  $B_{mn}^* \rho(\nu, T)$  – константа скорости процесса,  $B_{mn}^*$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, взаимодействие между молекулами и взаимодействие молекул с тепловым излучением в термодинамически равновесной системе осуществляется посредством реакций типа (1–3).

Согласно принципу детального равновесия состояние термодинамического равновесия в системе реализуется только тогда, когда каждая из возможных реакций в этой системе поддерживает это равновесие – больцмановское распределение населенностей по уровням энергии и постоянную плотность энергии равновесного теплового излучения. Другими словами, в термодинамически равновесной системе число переходов в единицу времени, обусловленных прямым процессом в каждой возможной реакции, равняется числу переходов, обусловленных обратным процессом в этой же реакции (см., например, [2]). В противном случае в системе могут возникать направленные движения и потоки энергии, и система будет неравновесной.

В рассматриваемой системе состояние термодинамического равновесия с температурой  $T$  будет реализовано при выполнении следующих условий (для простоты рассматриваем невырожденные уровни):

$$\frac{D_{mn}}{D_{nm}} = \exp(h\nu/kT), \quad (2)$$

$$\frac{A_{mn}^*}{B_{nm}^* \rho(\nu, T)} = \exp(h\nu/kT), \quad (3)$$

$$\frac{B_{mn}^*}{B_{nm}^*} = \exp(h\nu/kT). \quad (4)$$

Из (4) видно, что отношение коэффициентов пропорциональности  $B_{nm}^*$  и  $B_{mn}^*$  является функцией температуры. Поэтому и каждый из этих коэффициентов, входящих в скорости поглощения и вынужденного резонансного излучения, также является функцией температуры.

Из (4) следует, что при высоких температурах (при  $kT \gg h\nu$ ), когда  $\exp(h\nu/kT) \rightarrow 1$ , можно считать, что  $B_{mn}^* \approx B_{nm}^*$ .

С учетом (4) выражение (3) можно представить в виде:

$$\frac{A_{mn}^*}{B_{mn}^* \rho(\nu, T)} = 1. \quad (5)$$

Как известно, такую же равновесную систему рассматривал и Эйнштейн, когда вводил в физику понятия спонтанного и индуцированного излучения и соответствующих вероятностей переходов  $A_{mn}$ ,  $B_{mn} \rho(\nu, T)$  и  $B_{nm} \rho(\nu, T)$  [3]. Условие равновесия он записал в виде

$$N_m [A_{mn} + B_{mn} \rho(\nu, T)] = N_n B_{nm} \rho(\nu, T), \quad (6)$$

откуда получил выражение для плотности энергии теплового излучения в виде

$$\rho(\nu, T) = \frac{A_{mn}/B_{mn}}{\frac{B_{nm}}{B_{mn}} e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (7)$$

Считая, что с ростом  $T$  должно быть  $\rho \rightarrow \infty$ , а при малых температурах из (7) должен получаться закон Вина, Эйнштейн получил соотношения между введенными коэффициентами

$$B_{mn} = B_{nm} \quad (8)$$

и

$$\frac{A_{mn}}{B_{mn}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}. \quad (9)$$

С учетом (8) выражение (7) можно записать в виде

$$\frac{A_{mn}}{B_{mn} \rho(\nu, T)} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при малых температурах тепловое излучение в основном спонтанное, а при высоких температурах – стимулированное, или вынужденное. Но эти излучения, как известно, обладают разными свойствами. Никто не наблюдал, чтобы свойства теплового излучения зависели от температуры. Следовательно, условие (6), и выводы, сделанные на его основе, являются физически некорректными.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что:

- все электромагнитное излучение, созданное его элементарным источником – колеблющимся электроном – является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы;

- равновесное тепловое излучение – это вынужденное излучение. Оно состоит из излучения, получающегося при резонансном взаимодействии теплового излучения с возбужденными молекулами и излучения, получающегося в результате взаимодействия возбужденных молекул с другими молекулами при их тепловом движении;

- излучательные переходы, происходящие в молекулах, являются детерминированными процессами, которые протекают со своими скоростями;

- в термодинамически равновесной системе константы скоростей теплового излучательного перехода  $A_{mn}^*$  и резонансного излучательного перехода  $B_{mn}^* \rho(\nu, T)$  всегда равны и являются функциями температуры;

- коэффициенты пропорциональности  $B_{nm}^*$  и  $B_{mn}^*$  в скоростях поглощения и вынужденного резонансного излучения и их отношение являются функциями температуры.

Литература

1. Ельяшевич, М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. – М. : Физматгиз, 1962. – 892 с.

2. Физическая энциклопедия. Т. 1. / гл. ред. А. М. Прохоров. – Москва, Советская энциклопедия, 1988. – 507 с.

3. Эйнштейн, А. Собрание научных трудов. Т. 3. – М. : Наука, 1966. – 632 с.

УДК 621.373.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ  
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Nd:YAG С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Орехова В.Е.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>2</sup>, Орехов К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Пеленг»

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Проведено сравнение результатов экспериментального моделирования выходных параметров для нескольких вариантов резонаторов лазерного излучателя на основе кристалла Nd:YAG с диодной накачкой для применения в системах измерения дальности. Разработан компактный квантрон. Проведен расчет его профиля распределения и эффективности накачки для различных рабочих температур. В результате экспериментального моделирования схем резонатора с разработанным квантроном показано, что на основе разработанной компактной системы накачки возможна генерация моноимпульсов лазерного излучения в режиме активной модуляции добротности с энергией от 70 мДж и расходимостью до 1,7 мрад для частоты следования до 20 Гц.

**Ключевые слова:** поперечная диодная накачка, Nd:YAG, расходимость.

EXPERIMENTAL STUDY OF A DIODE-PUMPED Nd:YAG LASER

Orekhova V.<sup>1</sup>, Kisel V.<sup>2</sup>, Orekhov K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «Peleng»

<sup>2</sup>Optical Materials and Technology Research Center of BNTU  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The comparative experimental simulation of the output parameters for several types of diode-pumped Nd:YAG laser resonators for rangefinding were performed. A compact pump chamber is developed. A pump radiation distribution profiles and pumping efficiencies of the developed pump chamber were calculated for different operating temperatures. Experimental simulation of resonators design using the developed pump chamber was carried out. It was shown that laser based on the developed compact pump chamber can generate over 77 mJ pulses in Q-Switched mode with 1.7 mrad output beam divergence and pulse repetition rates up to 20 Hz.

**Key words:** transverse diode pumping, Nd:YAG, beam divergence.

Адрес для переписки: Орехова В.Е., ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Республика Беларусь  
e-mail: vikawatutsina@gmail.com

Была разработана оптическая схема твердотельного лазерного излучателя для импульсного дальномера, применяемого для определения расстояний до удаленных объектов. Основные требования, предъявляемые к разрабатываемому излучателю, следующие:

- энергия не менее 70 мДж;
- расходимость до 2 мрад;
- габариты корпусированного изделия не более 300×130×170 мм<sup>3</sup>;
- диапазон рабочих температур 0–+60 °С;
- устойчивость к вибрациям;
- способность работать в диапазоне частот следования импульсов от 0 до 20 Гц.

Основными критериями при разработке квантрона для обеспечения требуемой энергии импульса являлись высокий КПД, компактные размеры и эффективный отвод тепла от лазерного кристалла и матриц лазерных диодов. Отвод

тепла, возникающего во время работы в результате поглощения кристаллом излучения накачки, необходим для ослабления негативного влияния формирующейся динамической термолинзы, изменяющей модовый состав излучения, из-за чего ухудшается его пространственное качество и понижается выходная энергия [1]. Также предъявляются требования к равномерности профиля поглощения излучения накачки, обусловленные необходимостью избежания «горячих точек» [2] в кристалле, повышающих риск возникновения повреждений в резонаторе.

Была разработана односторонняя система накачки цилиндрического активного элемента диаметром 4 мм с относительной концентрацией ионов неодима 0,9 % и матированной боковой поверхностью, приведенная на рис. 1. Накачка обеспечивается тремя матрицами лазерных диодов с пиковой мощностью до 800 Вт расходимо-