

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Ю. П. Чукова

Л. Д. Ландау [1] показал, что при фотолюминесценции термодинамически допустимо получение КПД превышающего единицу, однако он считал это превышение незначительным и обнаружение его маловероятным, В предлагаемой работе получена формула для расчета максимального КПД люминесценции с учетом характеристик возбуждающего излучения и света люминесценции и оценена его абсолютная величина. При расчете приняты следующие обозначения: \dot{W}_B — мощность возбуждающего излучения, поглощаемого единицей поверхности люминесцирующего тела, \dot{W}_L — мощность люминесцентного излучения, испускаемого единичной поверхностью люминесцирующего тела, \dot{Q} — мощность теплового потока, подводимого к телу посредством теплопроводности, S_B — энтропия возбуждающего излучения, S_L — энтропия люминесцентного излучения, T — температура окружающего пространства.

Для системы, состоящей из окружающего пространства, находящегося с ним в тепловом равновесии люминесцирующего тела, возбуждающего излучения и света люминесценции, в стационарном состоянии имеем:

$$\dot{W}_B + \dot{Q} - \dot{W}_L = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dS_B}{dt} + \frac{\dot{Q}}{T} - \frac{dS_L}{dt} \geq 0, \quad (2)$$

причем равенство (2) выполняется только для обратимых процессов, и в любом макроскопическом участке системы приращение энтропии, обусловленное течением необратимых процессов, является положительным. Эти соотношения записаны в предположении, что можно пренебречь энергией и энтропией, которые заключены в поглощаемой и отраженной части излучения окружающего пространства, падающего на люминесцирующее тело, т. е. они справедливы при интенсивности люминесценции во много раз превосходящей интенсивность абсолютно черного тела при комнатной температуре. Из соотношений (1) и (2) для максимального

КПД люминесценции η имеем:

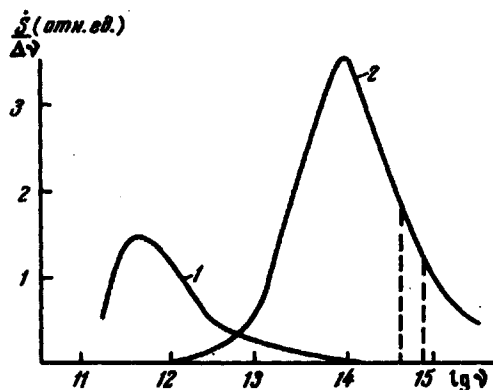
$$\eta < 1 + \frac{T}{\dot{W}_B} (\dot{S}_L - \dot{S}_B) = \frac{T_{\text{эфф}}^L}{T_{\text{эфф}}^L - T} \left(1 - \frac{T}{T_{\text{эфф}}^B} \right). \quad (3)$$

$$\text{Здесь } \eta = \frac{\dot{W}_L}{\dot{W}_B}, \quad T_{\text{эфф}}^L = \frac{\dot{W}_L}{\dot{S}_L} \text{ и } T_{\text{эфф}}^B = \frac{\dot{W}_B}{\dot{S}_B}.$$

Следовательно, во всех случаях, когда $\dot{S}_L > \dot{S}_B$, предельный КПД люминесценции будет выше единицы. При $\dot{S}_B = 0$ формула (3) переходит в формулу, полученную Вайнштейном [2]. Поток энтропии неполяризованного излучения через единицу поверхности в единицу времени определяется известной формулой статистики Бозе [3]:

$$\dot{S} = \frac{2\pi k}{c^2} \int \left[\left(1 + \frac{c^2 E_\nu}{2\pi h \nu^3} \right) \ln \left(1 + \frac{c^2 E_\nu}{2\pi h \nu^3} \right) - \frac{c^2 E_\nu}{2\pi h \nu^3} \ln \left(\frac{c^2 E_\nu}{2\pi h \nu^3} \right) \right] \nu^2 d\nu, \quad (4)$$

где E_ν — спектральная плотность излучения. При постоянстве E_ν в некотором узком диапазоне частот функция \dot{S}/\dot{W} имеет максимум, который по частоте совпадает с максимумом энтропии. На рисунке спектральная плотность потока энтропии дана как функция частоты (кривая 1 для $E_\nu = 4,6 \cdot 10^{-12}$ эрг/см², кривая 2 — для $E_\nu = 4,6 \cdot 10^{-5}$ эрг/см²).



Зависимость спектральной плотности потока энтропии от частоты для двух значений спектральной плотности потока энергии. Пунктиром выделена область частот видимого света

Если E_ν возбуждающего света и света люминесценции величины одного порядка, то при всех практически интересных интенсивностях (вплоть до $E_\nu = 10^{-3}$ эрг/см²) при возбуждении в стоксовой области $\dot{S}_L - \dot{S}_B > 0$ и возрастает с уменьшением длины волны возбуждающего света, т. е.

$\eta > 1$. Проведенный расчет показал, что при возбуждении в антистоксовой области, где до сих пор искали КПД выше единицы, получить его можно либо при спектральной плотности возбуждения большей 10^{-3} эрг/см^2 , либо при возбуждении очень узкой спектральной линией. Например, для получения $\eta = 130\%$ фотолюминесценции имеющей яркость 300 нкв в диапазоне длин волн видимого света, необходимо для возбуждения использовать линию шириной менее 10^{-4} \AA . Это объясняет неудачи многочисленных попыток обнаружить превышение КПД люминесценции над единицей.

Напротив, при возбуждении в стоксовой области и практически используемой ширине линий термодинамический предел КПД может достигать 160%. Наиболее реальным путем для его получения следует считать наблюдавшийся на опыте механизм фотонного умножения [4] или другие механизмы, обеспечивающие квантовый выход выше единицы.

При возбуждении люминесценции в диапазоне радиоволн (электролюминесценция) предельный КПД превышает единицу практически при любой форме возбуждающего поля.

Автор выражает благодарность М.В.Фоку за обсуждение результатов работы.

Всесоюзный
научно-исследовательский
светотехнический институт

Поступила в редакцию
2 октября 1969 г.

Литература

- [1] L.D.Landau. J. Phys. USSR, 10, 503, 1946.
- [2] M.A.Weinstein. J. Opt. Soc. Am., 50, 597, 1960.
- [3] М.Пляк. Теория теплового излучения, М. 1956.
- [4] Сб. Фотонное умножение в кристаллах. Тр. ИФА АН ЭССР, 34, 1966.