

01;07

Пороговая чувствительность антистоксового преобразователя частоты

© С.Н. Андрианов, В.П. Иванов, Ю.Е. Польский

ФГУП НПО „Государственный институт прикладной оптики“, Казань
E-mail: andrianov@bancorpr.ru

Поступило в Редакцию 4 декабря 2004 г.

С помощью метода скоростных уравнений получены выражения для пороговой чувствительности квантового преобразователя инфракрасного излучения в видимое излучение для двух различных схем энергетических уровней активных атомов. На основе полученных выражений предложены критерии, предъявляемые к построению практических устройств.

В 1959 г. Н. Бломберген предложил использовать антистоксовую люминесценцию редкоземельных ионов для преобразования инфракрасного излучения в видимое излучение [1]. Впоследствии исследовалось [2–6] такое антистоксовое преобразование в двух схемах энергетических уровней (рис. 1, 2). Целью данной работы является определение пороговой чувствительности антистоксового преобразования в двух этих схемах и их сравнительный анализ. Для этого мы будем использовать метод скоростных уравнений в допущении, что энергия фотонов накачки и антистоксового излучения намного превосходит среднюю тепловую энергию фононов в рассматриваемом образце.

Рассмотрим систему трехуровневых атомов, взаимодействующих с электромагнитным полем и тепловыми колебаниями кристаллической решетки в энергетической схеме рис. 1. Фотоны накачки n_p переводят атомы из основного состояния 1 в возбужденное состояние 2, откуда сигнальные фотоны n_s переводят атомы в другое возбужденное состояние 3, а затем происходит спонтанное излучение фотонов n_{f_1} на переходе $3 \rightarrow 1$. Также имеют место переходы $\Phi(T)$ между уровнями 2 и 3 под действием фононов и спонтанное излучение фотонов n_{f_2} на переходе $2 \rightarrow 1$.

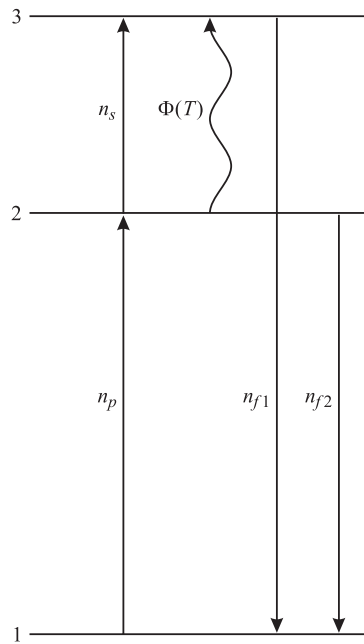


Рис. 1. Схема энергетических уровней и переходов с поглощением инфракрасного кванта при переходе из возбужденного состояния.

Соответственно система скоростных уравнений для населенностей соответствующих уровней N_1 , N_2 и N_3 имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= -A_{31}N_3 - \sigma_{31}n_{f_1}(N_3 - N_1) \\ &\quad - A_{32}N_3 - \sigma_{32}n_s(N_3 - N_2) - R_{32}N_3 - R_{32}\Phi(T)(N_3 - N_2), \\ \frac{dN_2}{dt} &= -A_{21}N_2 - \sigma_{21}n_{f_2}(N_2 - N_1) - \sigma_{21}n_p(N_2 - N_1) + A_{32}N_3 \\ &\quad + \sigma_{32}n_s(N_3 - N_2) + R_{32}N_3 + R_{32}\Phi(T)(N_3 - N_2), \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 = N,$$

где A_{mn} — скорость спонтанного излучения фотонов на переходе m, n , σ_{mn} — сечение вынужденного излучения фотонов на переходе m, n ,

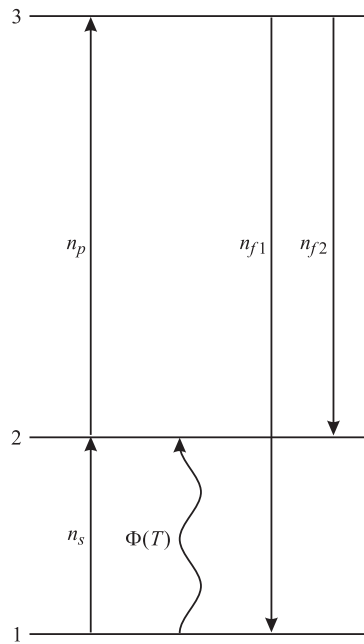


Рис. 2. Схема энергетических уровней и переходов с поглощением инфракрасного кванта при переходе из основного состояния.

R_{32} — скорость спонтанного испускания фононов на переходе $3 \rightarrow 2$,
 N — общее число атомов.

Считая число фотонов флюоресценции в образце малым, можно пренебречь соответствующими слагаемыми в уравнениях (1) и для отношения сигнал/шум получим

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{\sigma_{32}n_s}{R_{32}\Phi(T)}. \quad (2)$$

Рассмотрим систему трехуровневых атомов, взаимодействующих с электромагнитным полем и тепловыми колебаниями кристаллической решетки в энергетической схеме рис. 2. Сигнальные фотоны n_s переводят атомы из основного состояния 1 на промежуточный уровень 2, откуда фотоны накачки n_p переводят атомы в возбужденное состояние 3,

а затем происходит спонтанное излучение фотонов n_{f_1} на переходе $3 \rightarrow 1$. Также имеют место переходы $\Phi(T)$ между уровнями 1 и 2 под действием фононов и спонтанное излучение фотонов n_{f_2} на переходе $3 \rightarrow 2$.

Система скоростных уравнений на населенности соответствующих уровней N_1 , N_2 и N_3 имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= -A_{31}N_3 - \sigma_{31}n_{f_1}(N_3 - N_1) \\ &\quad - A_{32}N_3 - \sigma_{32}n_{f_2}(N_3 - N_2) - \sigma_{32}n_{f_2}(N_3 - N_2), \\ \frac{dN_2}{dt} &= -A_{21}N_2 - \sigma_{21}n_s(N_2 - N_1) + A_{32}N_3 + \sigma_{32}n_{f_2}(N_3 - N_2) \\ &\quad + \sigma_{32}n_p(N_3 - N_2) + R_{32}N_2 + R_{32}\Phi(T)(N_1 - N_2), \\ N_1 + N_2 + N_3 &= N, \end{aligned} \quad (3)$$

где A_{mn} — скорость спонтанного излучения фотонов на переходе $m \rightarrow n$, σ_{mn} — сечение вынужденного излучения фотонов на переходе $m \rightarrow n$, R_{21} — скорость спонтанного испускания фононов на переходе $2 \rightarrow 1$, N — общее число атомов.

Считая число фотонов флюоресценции в образце малым, можно пренебречь вторым слагаемым в правой части уравнения (1) и для отношения сигнал/шум получим

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{\sigma_{21}n_s}{R_{21}\Phi(T)}. \quad (4)$$

Пороговая чувствительность преобразователя определяется из условия $(S/N) = 1$. Отсюда, пользуясь формулами (2) и (4), для минимально детектируемого числа инфракрасных квантов получим

$$n_s = \Phi(T) \frac{R_{mn}}{\sigma_{mn}}, \quad (5)$$

где $m = 3$, $n = 2$ для схемы 1 и $m = 2$, $n = 1$ для схемы 2.

Формула (5) показывает, что чувствительность преобразователя тем выше, чем больше сечение вынужденного излучения на инфракрасном переходе $3 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$ для схем рис. 1 и 2 соответственно и

чем меньше интенсивность вынужденных фононных процессов. Это означает, что:

1) необходимо выбирать ионы с такой структурой уровней, чтобы уровни 2 и 3 в схеме рис. 1 и уровни 1 и 2 в схеме рис. 2 принадлежали различным термам;

2) необходимо выбирать такую матрицу, чтобы электрон-фононная связь примесных ионов в матрице была слабой.

Из критерия 1) следует, что первая схема предпочтительна для построения рассматриваемого антистоксового преобразователя, так как в большинстве редкоземельных ионов уровни, близко расположенные к уровню основного состояния, принадлежат к тому же терму, что и уровень основного состояния. Критерий 2) указывает на то, что для построения преобразователя следует выбирать образцы с малой интенсивностью фононного крыла в линии поглощения примесных ионов. Оценки показывают, что для иона Eu^{3+} в матрицах с малой величиной электрон-фононной связи, таких как LaF_3 , LaBr_3 [7], при обычной для фотоприемников ИК-диапазона рабочей температуре 77 К пороговая чувствительность не хуже 10^{18} фотонов на квадратный метр.

Список литературы

- [1] *Bloembergen N.* // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. N 3. P. 84–85.
- [2] *Porter J.F.* // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 7. N 11. P. 414–415.
- [3] *Brown M.R., Shand W.A.* // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 11. N 8. P. 366–368.
- [4] *Brown M.R., Shand W.A.* // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 12. N 13. P. 367–369.
- [5] *Wright J.C., Fong F.K., Miller M.M.* // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 10. P. 3806–3811.
- [6] *Esterowitz L., Schilzer, Noonan J., Bahler J.* // Appl. Opt. 1968. V. 7. N 10. P. 2053–2070.
- [7] *Чукова Ю.П.* Антистоксова люминесценция и новые возможности ее применения. М., 1980. 192 с.