

12. Изюмов Ю. А., Найш В. Е., Сыромятников В. Н. «Кристаллография», 1976, 21, 256.

Поступила в редакцию
11.3 1977 г.
Кафедра
физики твердого тела

УДК 535.14 : 621.378

В. Ф. Королев

ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РОТАТОРА

В предлагаемой работе решается задача о мощности индуцированного излучения жесткого ротатора, совершающего квантовые переходы из состояния с квантовым вращательным числом J при его взаимодействии с линейно-поляризованной электромагнитной волной $E = E_0 \cos \omega t$. Эти переходы с излучением с уровня J совершаются на уровень $J-1$, который расселяется с помощью источника накачки так, что ротатор практически мгновенно возвращается на уровень J . При этом учитывается, что имеется не равная нулю вероятность перехода ротатора в состояние $J+1$. Однако, как показано в работе, при отрицательных разностях частоты внешнего поля и собственных частот ротатора, будет иметь место только излучение, поэтому уровень $J+1$ заселяться не будет. Имеющая место конечная возможность перехода на уровень $J+1$ лишь уменьшит результирующую вероятность перехода с излучением. Эта результирующая вероятность равна алгебраической сумме вероятностей перехода вверх и вниз.

Отличительной особенностью применяемого в данной работе метода является то, что он базируется на развитом в работе [1] квазиклассическом методе, в основе которого лежит принцип соответствия между квантовой и классической теорией излучения. Результат этого метода состоит в том, что сразу получается выражение для мощностей излучения, из которых вероятности переходов получаются путем деления их на величину излучаемого кванта. Но в настоящей работе данный переход не является необходимым. В работе [1] получена формула для мощности индуцированного излучения (поглощения) при квантовом переходе между двумя уровнями W_n и W_m квантовой системы, взаимодействующей с внешним электромагнитным полем. Эта формула имеет вид

$$P_{nm} = \frac{f_{nm} e^{*2} E_0^2 \omega^2 \gamma^*}{2MZ_{nm}^2}, \quad (1)$$

где f_{nm} — сила осциллятора для данного квантового перехода, M и e^* — масса и эффективный заряд частицы, E_0 и ω — амплитуда и частота внешней электромагнитной волны, γ^* — коэффициент затухания.

Величина Z_{nm}^2 дается выражением

$$Z_{nm}^2 = (\omega_{nm}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^{*2}. \quad (2)$$

При переходе с уровня, определяемого вращательным квантовым числом J , на уровень с вращательным квантовым числом $J-1$ мощность излучения определится

$$P_{J,J-1} = \frac{f_{J,J-1} e^{*2} E_0^2 \omega^2 \gamma^*}{2MZ_{J,J-1}^2}. \quad (3)$$

Для перехода с уровня J на уровень $J+1$ будет иметь место поглощение, мощность которого определится

$$P_{J,J+1} = \frac{f_{J,J+1} e^{*2} E_0^2 \omega^2 \gamma^*}{2MZ_{J,J+1}^2}. \quad (4)$$

Частоты $\omega_{J,J+1}$ и $\omega_{J,J-1}$ по абсолютной величине определяются по правилу частот Бора:

$$\omega_{J,J+1} = \frac{W_{J+1} - W_J}{\hbar} = 2B(J+1), \quad (5)$$

$$\omega_{J,J-1} = \frac{W_J - W_{J-1}}{\hbar} = 2BJ, \quad (6)$$

где B — вращательная постоянная молекулы (ротатора).

Если населенность уровня J равна N_J , то результирующая мощность, которой обменивается волна с осцилляторами, равна

$$P_{J,J-1}^{J,J+1} = \frac{e^{*2} E_0^2 \omega^2 \gamma^* N_J}{2M} \left\{ \frac{f_{J,J+1}}{Z_{J,J+1}^2} + \frac{f_{J,J-1}}{Z_{J,J-1}^2} \right\}. \quad (7)$$

Сила осциллятора для перехода между уровнями J и J' выражается формулой

$$f_{JJ'} = \frac{2M}{3e^{*2}} \cdot \frac{\omega_{JJ'}}{\hbar g_J} |D_{JJ'}|^2, \quad (8)$$

где g_J — статистический вес уровня J .

Сила перехода (сила линии) согласно [2] определяется следующим образом:

$$|D_{JJ'}|^2 = \mu_0^2 [\delta_{J'-1, J} J' + \delta_{J'+1, J} (J' + 1)]. \quad (9)$$

С учетом соотношения (9), а также (5) и (6), $P_{J,J-1}^{J,J+1}$ будет равна

$$P_{J,J-1}^{J,J+1} = \frac{2E_0^2 \omega^2 B \mu_0^2 \gamma^* N_J}{3\hbar Z_{J,J+1}^2} \left\{ 1 + \frac{8B^2 J^2}{Z_{J,J-1}^2} [\omega^2 - 2B^2 (2J^2 + 2J + 1)] \right\}. \quad (10)$$

Выражение (10) представляет собой результирующую мощность индуцированного излучения ротаторов. Если теперь положить $J \sim 5-10$, то частоты $\omega_{J,J-1}$ и $\omega_{J,J+1}$ можно положить равными

$$\omega_{J,J-1} = \omega_{J,J+1} = \omega_J = 2BJ. \quad (11)$$

С учетом (11) соотношение (10) преобразуется так:

$$P_{J,J-1}^{J,J+1} = \frac{\mu_0^2 E_0^2 \omega^2 \gamma^* N_J}{3I [(\omega_J^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^{*2}]} \left\{ 1 + \frac{8B^2 J^2 [\omega^2 - \omega_J^2]}{[(\omega_J^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^{*2}]} \right\}. \quad (12)$$

Учитывая, что $\gamma^* = \frac{1}{\tau^*}$ (τ^* — среднее время возбужденного состояния) и $\omega + \omega_J \approx 2\omega$, получаем

$$P_{J,J-1}^{J,J+1} = \frac{\tau^* \mu_0^2 E_0^2 N_J}{3I \{ [2\tau^* (\omega_J - \omega)]^2 + 1 \}} \left\{ 1 + \frac{8\tau^{*2} B^2 J^2 [\omega^2 - \omega_J^2]}{\omega^2 \{ [2\tau^* (\omega_J - \omega)]^2 + 1 \}} \right\}. \quad (13)$$

В свою очередь

$$\omega^2 - \omega_J^2 = (\omega + \omega_J)(\omega - \omega_J) \approx 2\omega(\omega - \omega_J). \quad (14)$$

Учитывая соотношение (14) и обозначая

$$\alpha = 2\tau^* (\omega - \omega_J), \quad (15)$$

выражение для мощности $P_{J,J-1}^{J,J+1}$ (отношение $\frac{\omega_J}{\omega} \approx 1$) можно записать в виде

$$P_{J,J-1}^{J,J+1} = \frac{\tau^* \mu_0^2 E_0^2 N_J}{3I (1 + \alpha^2)} \left\{ 1 + \frac{2\tau^* \omega_J \alpha}{1 + \alpha^2} \right\}. \quad (16)$$

Анализируя выражение (16), можно сделать вывод, что индуцированное излучение будет иметь место, когда второй член в скобке выражения (16) отрицателен (что возможно, если $\omega < \omega_J$) и по абсолютной величине больше 1. Максимальное отрицательное значение второй член в скобке имеет при $\alpha = -1$, тогда $\frac{\alpha}{1 + \alpha^2} = -\frac{1}{2}$. Для $\omega \sim 10^{13}$ Гц $\tau^* \sim 10^{-9}$ с и $\alpha = -1$, единицей в скобке выражения (16) можно пренебречь.

Мощность индуцированного излучения определится (записываем со знаком минус)

$$P_{J, J-1}^{J, J+1} = - \frac{\tau^{*2} \mu_0^2 E_0^2 N_J \hbar J}{6J^2} \quad (17)$$

Проведем оценку величины $P_{J, J-1}^{J, J+1}$ для молекулы HCl. Пусть $N_J = 10^8$ мол/см³, $\tau^* = 10^{-9}$ с, $E_0 = 1/10$ CGSE/см, и $J = 5$; величины μ_0 и I для молекулы HCl равны $\mu_0 = 1,04 \cdot 10^{-18}$ CGSE · см, $I = 2,6 \cdot 10^{-40}$ г · см².

Подставляя эти величины в (17), находим мощность

$$P_{J, J-1}^{J, J+1} \cong 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^3.$$

Проведенный расчет и анализ формулы для мощности показывает, что для получения достаточно больших мощностей излучения необходимо сильное внешнее электромагнитное поле и поддержание высокого уровня инверсии в активной среде.

В заключение приношу глубокую благодарность А. И. Осипову за обсуждение данной работы и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев В. Ф. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астроном.», 1976, 17, № 5, 515.
2. Пеннер С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. М., 1963.

Поступила в редакцию
5.4 1977 г.
Кафедра
молекулярной физики и механики