

Поступила в редакцию
11.11.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 2

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373:535

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВКР В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА ПРИ НЕРЕЗОНАНСНОМ ЗАСЕЛЕНИИ УРОВНЕЙ АТОМОВ Rb И Cs

Т. С. Бимагамбетов, В. И. Одинцов

(кафедра оптики и спектроскопии)

Экспериментально и теоретически исследованы энергетические характеристики вынужденного ИК излучения и ИК ВКР в парах Rb и Cs при возбуждении в условиях нерезонансного заселения начальных уровней.

В работах [1—3] было установлено, что вынужденное излучение на инфракрасном (ИК) атомном переходе Rb $6^2P_{3/2} - 5^2D_{5/2}$ (рис. 1, а) может быть получено при перестройке частоты накачки ω_L не только в окрестности двухфотонного резонанса $5^2S_{1/2} - 5^2D_{5/2}$, но и в широкой области, включающей однофотонные резонансы $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}$ и $5^2P_{3/2} - 5^2D_{5/2}$. Можно предположить, что при удалении ω_L от двухфотонного резонанса заселение верхнего уровня $5^2D_{5/2}$ происходит с участием оптико-столкновительных (ОС) переходов [4], показанных на рис. 1 волнистыми стрелками. Вследствие относительно небольших частотных расстройек эффективность таких переходов оказывается достаточно велика. Так, при $\omega_L \approx \omega_{23}$ (см. цифровые обозначения уровней на рис. 1, а, ω_{ij} — частота перехода $i-j$) расстройка $\Delta_{12} = \omega_L - \omega_{12} \approx 70 \text{ см}^{-1}$ и оценка в рамках ударной теории дает при плотности атомов $N = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и интенсивности накачки $I_L = 10 \text{ МВт/см}^2$ населенность уровня 2 $N_2 \sim 0,1 N$. Об эффективном нерезонансном заселении уровня 2 свидетельствует и возбуждение с этого уровня ИК ВКР на частоте ω_S (см. рис. 1, а) [2].

Для подтверждения указанного механизма возникновения ИК излучения была исследована зависимость интенсивности линии $6^2P_{3/2} - 5^2D_{5/2}$ ($\lambda = 5,23 \text{ мкм}$) от плотности атомов N и интенсивности накачки I_L при $\omega_L = \omega_{23}$. Источником накачки служил лазер на красителе с длительностью импульса $\tau_L = 25 \text{ нс}$ и шириной спектра генерации $0,2 \text{ см}^{-1}$. Диаметр светового пучка в кювете длиной $l = 20 \text{ см}$ составлял 3 мм. Максимальная интенсивность накачки равнялась 3 МВт/см^2 . Плотность атомов изменялась от $2,8 \cdot 10^{15}$ ($t = 230^\circ \text{ C}$) до $1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($t = 270^\circ \text{ C}$). Эксперимент показал, что энергия линии $5,23 \text{ мкм}$ $W \sim I_L N^2$. Поскольку при $\omega_L = \omega_{23}$ вероятность перехода атомов с уровня 2 на уровень 3 ω_{23} велика ($\omega_{23} \tau_L \gg 1$), то мощность ИК излучения на переходе 4—3 определяется скоростью

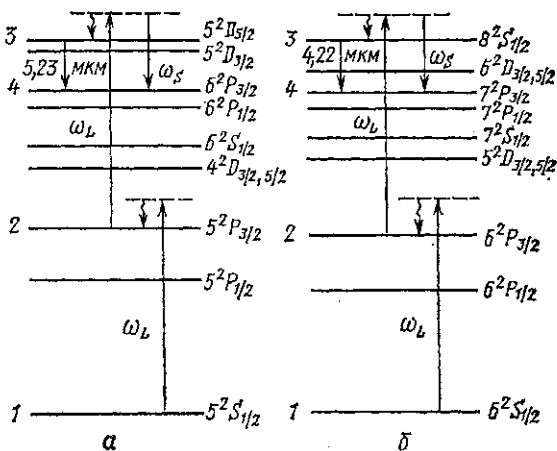


Рис. 1. Схемы энергетических уровней атомов Rb (а) и Cs (б)

ОС перехода атомов с основного уровня 1 на уровень 2. Последняя при $N_1 \approx N$ пропорциональна $I_L N^2$ [4], что объясняет экспериментальную зависимость W от I_L и N .

Что касается возможности заселения уровня $5^2D_{5/2}$ с расположенных выше уровней атома, о которой говорилось в [2, 5], то в настоящей работе было установлено отсутствие верхних ИК переходов, включая переходы $5^2D_{3/2,5/2} - 7^2P_{1/2,3/2}$ и $4^2F_{5/2,7/2} - 6^2D_{3/2,5/2}$. Сообщение о наблюдении указанных переходов в [2, 5] явилось следствием экспериментальной ошибки автора работы [5].

ВКР на частоте ω_S (см. рис. 1, а, б) обладает рядом особенностей, обусловленных нерезонансным характером заселения исходного уровня 2. Пространственно-временное изменение интенсивности ВКР и населенности N_2 при монохроматической накачке описывается уравнениями

$$\frac{\partial J_S(\omega_S, t, z)}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial J_S(\omega_S, t, z)}{\partial t} = P_0(\omega_S, t, z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2(t, z)}{\partial t} = N_1 \omega_{12}(t, z) - \frac{1}{\hbar \omega_S} \int P_0(\omega_S, t, z) d\omega_S, \quad (2)$$

$$P_0(\omega_S, t, z) = \gamma(\omega_S) I_L(t, z) N_2(t, z) [J_S(\omega_S, t, z) + A]. \quad (3)$$

Здесь J_S — спектральная плотность интенсивности ВКР, v — скорость излучения ВКР в среде, P_0 — спектральная плотность мощности, выделяемой в единице объема на частоте ω_S , $\gamma(\omega_S)$ — коэффициент усиления ВКР на частоте ω_S , рассчитанный на единичную интенсивность накачки и единичную плотность частиц на уровне 2,

$$A = \frac{\hbar \omega_S \Delta \mathcal{O}}{2\pi \lambda_S^2}, \quad \Delta \mathcal{O} — \text{телесный угол, в котором распространяется излучение ВКР,}$$

ω_{12} — вероятность ОС перехода 1→2. Для простоты считается, что ВКР развивается только в направлении распространения пучка накачки (учет обратного ВКР не вносит принципиальных изменений). Населенность конечного уровня 4 считается малой, $N_4 \ll N_2$. Отсутствие этого уровня осуществляется путем вынужденных каскадных переходов на расположенные ниже уровни атома [1]. Уменьшение N_2 вследствие ОС переходов на уровень 3 считается малым.

Решение системы (1)–(3) легко находится в случае прямоугольной формы импульса накачки. Для интегральной интенсивности ВКР $I(t, z) = \int J_S(\omega_S, t, z) d\omega_S$ получается соотношение $1/I_S(t, z) = 1/I_S^0(t, z) + 1/I_S^{np}(t, z)$, где $I_S^0 = A \Delta \omega_S (\exp G^0 - 1)$, $\Delta \omega_S$ — ширина линии ВКР, $G^0 = \gamma N_2^0 I_L z$ — инкремент усиления ВКР при неустойчивой населенности уровня 2 N_2^0 , $0 \leq z \leq l$, $\gamma = \gamma(\omega_S)$, ω_S — центральная частота линии ВКР, I_S^{np} — предельная интенсивность ВКР, определяемая скоростью ОС перехода атомов на уровень 2, $I_S^{np} = \hbar \omega_S N_1 \omega_{12}$.

Энергия ВКР $W_S(t, z)$, прошедшая к моменту времени t через сечение z , равна

$$W_S(t, z) = W_S^{np}(t, z) \frac{1}{G^0(t, z)} \ln(1 - e^{G^0 - G^{np}}), \quad (4)$$

где предельная энергия $W_S^{np}(t, z) = I_S^{np}(t, z) \sigma t$, $0 \leq t \leq \tau_L$, σ — площадь поперечного сечения пучка ВКР, а величина $G^{np}(t, z)$ определяется из соотношения $I_S^{np} = A \Delta \omega_S (\exp G^{np} - 1)$. Учитывая, что при расстройках, значительно превышающих ширину комбинационного перехода, $\gamma \sim 1/\Delta_{23}$, из (4) можно получить зависимость W_S от параметра $\xi = \Delta_{23}/\Delta_{23}$, где $\Delta_{23} > 0$ определяется из соотношения $G^0(\tilde{\Delta}_{23}) = G^{np}$ (рис. 2). При $1 - |\xi| \gg 1/2G^{np}$ с высокой точностью $W_S = W_S^{np}(1 - \xi^2)$. Расстройка Δ_{23} , определяющая область интенсивного ВКР, оказывается приблизительно пропорциональной I_L .

Пороговая интенсивность накачки $I_L^{пор}$ может быть найдена из (4), если положить $W_S = W_S^{пор}$, где $W_S^{пор}$ — пороговая энергия ВКР. Представив $W_S^{пор} = a I_L$, получим при $\Delta_{23} \rightarrow 0$ $I_L^{пор} \rightarrow W_S^{пор}/a$. При малых расстройках $I_L^{пор}$ медленно возрастает с увеличением $|\Delta_{23}|$. При больших расстройках $|\Delta_{23}| > \tilde{\Delta}_{23}$ $I_L^{пор} \sim \Delta_{23}$.

Было проведено экспериментальное исследование пороговых и энергетических характеристик ВКР при нерезонансном заселении исходного уровня в условиях большой расстройки. ВКР возбуждалось в парах Cs на комбинационном переходе $6^2P_{3/2} - 7^2P_{3/2}$ (см. рис. 1, б) при расстройке ω_L в окрестности перехода $6^2P_{3/2} - 8^2S_{1/2}$ (расстройка $\Delta_{12} \sim 850$ см⁻¹). Температура паров равнялась 350° С ($N = 10^{17}$ см⁻³). Диаметр светового пучка в кювете длиной 20 см составлял ~ 1 мм. Экспериментальная пороговая энергия ВКР $W_S^{пор}$ равнялась $3 \cdot 10^{-8}$ Дж. На рис. 3 представлена

частотная зависимость средней за время возбуждающего импульса мощности ВКР $P_S = W_S/\tau_L$, полученная при постоянной мощности накачки $P_L = 200$ кВт, а также частотная зависимость пороговой мощности накачки $P_L^{пор}$. Видно, что эксперимент подтверждает теоретический вывод о слабом изменении $I_L^{пор}$ при малых расстройках.

Наряду с ВКР было исследовано вынужденное ИК излучение на переходе атома Cs $7^2P_{3/2} - 8^2S_{1/2}$ ($\lambda = 4,22$ мкм). Обнаружено, что его энергия растет при приближении к резонансу вплоть до расстроек $|\Delta_{23}| \sim 4$ см $^{-1}$, а затем начинает уменьшаться. Уменьшение W может быть связано с конкуренцией со стороны описанного выше ИК ВКР, которое при малых расстройках эффективно опустошает исходный уровень 2.

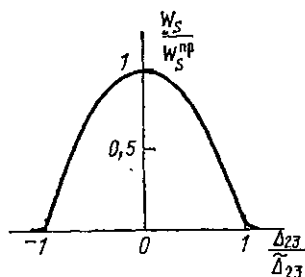


Рис. 2. Теоретическая зависимость энергии ВКР от частотной расстройки при $G^{пор} = 28$

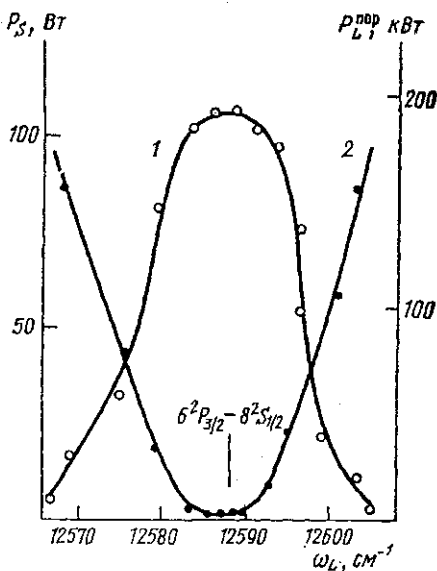


Рис. 3. Экспериментальные зависимости мощности ИК ВКР P_S (1) и порога возбуждения $P_L^{пор}$ (2) от частоты накачки ω_L

В заключение отметим, что особенности вынужденного излучения и ВКР при оптико-столкновительном заселении атомных уровней представляют интерес для преобразования лазерного излучения в парах металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Королев Ф. А., Мартынов В. В., Одинцов В. И., Фахми А. О. // Опт. и спектр. 1976. 40, № 6. С. 1043—1049. [2] Королев Ф. А., Знаменский Н. В., Одинцов В. И. // Письма в ЖЭТФ. 1978, 28, № 7. С. 453—456. [3] Бахрамов С. А., Кирил И. Г., Хабибуллаев П. К., Шаабдурахманова Н. Ш. // Квант. электроника. 1982, 9, № 12. С. 2386—2391. [4] Бонч-Бруевич А. М., Пржибельский С. Г., Хромов В. В., Яковленко С. И. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1984, 48, № 3. С. 587—595. [5] Знаменский Н. В. Канд. дис. М., 1980.

Поступила в редакцию
11.05.87