

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛИНИИ РЕЗОНАНСНОГО ВКР В ГАЗЕ В ПОЛЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

*Е. В. Каклаков, И. М. Бетеров, Б. Я. Дубецкий
В. П. Чеботаяев*

В работе сообщается об экспериментальном обнаружении резонанса нового типа при многофотонных переходах в поле стоячей волны в рамановском газовом лазере. Теория показывает, что резонанс возникает в третьем порядке теории возмущений, когда линия резонансного ВКР неоднородно уширена и может рассматриваться как эффект перекрытия провалов в распределении нелинейной поляризации по скоростям наведенной полем стоячей волны.

За последнее время повысился интерес к резонансам многофотонного поглощения в газе в поле стоячей волны [1], которые обладают свойствами, интересными для спектроскопии и приложений (см. [2]). В этой работе мы сообщаем о наблюдении резонанса нового типа, обусловленного насыщением линии резонансного ВКР в поле стоячей волны из-за многофотонных переходов.

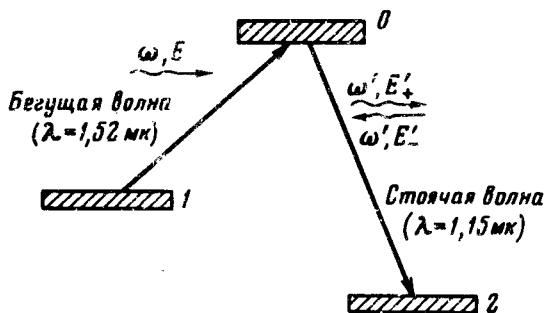


Рис. 1. Схема уровней

Как известно [3], под действием поля частоты ω , резонансной переходу $1 \rightarrow 0$, на смежном переходе $0 \rightarrow 2$ (рис. 1) возникают узкие линии вынужденного излучения с ширинами Γ_+ и Γ_- ,

$$\Gamma_+ = \gamma_1 + \gamma_2 + \left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} - 1 \right) (\gamma_1 + \gamma_0); \quad (1)$$

$$\Gamma_- = \gamma_0' + \gamma_2 + (\omega_{02} / \omega_{01}) (\gamma_1 + \gamma_0),$$

где $\gamma_1, \gamma_0, \gamma_2$ — скорости затухания соответствующих уровней. Индекс (+) соответствует случаю, когда падающая и рассеянная волна распро-

страняются в одном направлении, (-) – в противоположном. Резонансы расположены на частотах

$$\omega_{\pm}' = \omega_{0,2} \pm (\omega_{0,2} / \omega_{0,1}) (\omega - \omega_{0,1}). \quad (2)$$

Описываемый в работе резонанс имеет место, когда разность частот $\omega' - \omega$ равна частоте запрещенного перехода. Его ширина γ равна ширине запрещенного перехода $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$. Из проведенного нами теоретического анализа следует, что он возникает в третьем порядке теории возмущений и может рассматриваться как следствие эффектов насыщения при многофотонных переходах, когда линия ВКР неоднородно уширена. Это явление представляет интерес для стабилизации частот газовых лазеров, лазерной спектроскопии и измерения частот запрещенных переходов.



Рис. 2. Запись формы линии генерации при расстройке частоты волны накачки $\Omega = 50 \text{ Mc}$

Резонансный провал в центре линии наблюдался на зависимости мощности генерации от частоты ВКР лазера на неоне на длине волны $1,15 \text{ мкм}$ (переход $2s_2 - 2p_4$) при накачке полем на $1,5 \text{ мкм}$ на смежном переходе $2s_2 - 2p_1$. Генерация в такой системе и форма линии ВКР исследовалась в работах [4, 5]. В [5] было показано, что форма линии определяется в основном двухквантовыми переходами. Линия усиления в лазере имеет характерную анизотропию. При расстройке ω от центра линии и сканировании частоты генерации лазера наблюдается два пика, каждый из которых соответствует линии усиления одной из бегущих волн на переходе $0 \rightarrow 2$ (рис. 2). Вблизи центра линии характер генерации изменяется. В линии генерации возникает неглубокий, но резко очерченный провал с шириной $\sim 10 \text{ Mc}$, близкой к ширине двухфотонного перехода $2p_1 - 2p_4$ (см. рис. 3). Заметим, что ширина лэмбовского провала на линии $1,15 \text{ мкм}$ в данных условиях составляет величину порядка 45 Mc . Дадим объяснение наблюдаемому явлению и приведем результаты расчета. Вероятность перехода атома с уровня 1 на уровень 2

определяется следующим выражением:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \frac{2 |G|^2 |G'|^2}{[(\gamma_1 + \gamma_0)/2]^2 + \Omega^2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\gamma_1} \frac{1}{[(\gamma_1 + \gamma_2)/2] + i(\Omega' - \Omega)} + \frac{1}{\gamma_0} \frac{1}{[(\gamma_0 + \gamma_2)/2] + i\Omega'} + \frac{1}{[(\gamma_1 + \gamma_2)/2] + i(\Omega' - \Omega)} \frac{1}{[(\gamma_0 + \gamma_2)/2] + i\Omega'} \right\}, \quad (3)$$

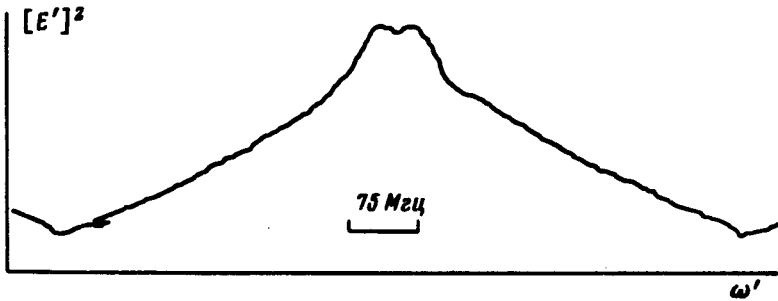


Рис. 3. Резонансный провал на зависимости мощности генерации от частоты при настройке волны накачки на центр линии (широкая часть линии обусловлена диффузией возбуждения в пространстве скоростей вследствие пленения резонансного излучения [4])

где $\Omega = \omega - \omega_{01}$, $\Omega' = \omega' - \omega_{02}$, $G = d_{01} E / (2\hbar)$, $G' = d_{02} E' / (2\hbar)$, d_{01} и d_{02} — матричные элементы переходов $0 \rightarrow 1$ и $2 \rightarrow 0$. Как уже отмечалось в [5] рассмотрение только двухквантовых переходов в условиях резонанса возможно, когда $\gamma_0 \gg \gamma_1$. В общем случае наряду с двухквантовыми процессами типа ВКР в рассматриваемой схеме, имеют место одноквантовые ступенчатые переходы (второй член (3)) и линия излучения определяется интерференцией этих процессов. При $\Omega, \Omega' \sim 0$ и $\gamma_0 \gg \gamma_1$ вторым и третьим членами можно пренебречь и рассматривать переход $1 \rightarrow 2$ как резонансное ВКР. Линия излучения отдельного атома имеет ширину $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$, значительно меньшую, чем излучение ансамбля атомов. При $\omega_{02} / \omega_{01} > 1$ линия ВКР вперед и назад испытывает таким образом сильное неоднородное уширение.

Вероятность перехода для атомов имеющих проекцию скорости v в поле стоячей волны имеет вид

$$W_{1 \rightarrow 2}(v) = \frac{2 |G|^2 |G'|^2}{\left(\frac{\gamma_1 + \gamma_0}{2}\right)^2 + \left(\Omega - \frac{\omega}{c} v\right)^2} \times \operatorname{Re} \sum_{+, -} \left[\frac{1}{\gamma_1} \frac{1}{\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + i\left(\Omega' \mp \frac{\omega'}{c} v - \Omega + \frac{\omega}{c} v\right)} \right]. \quad (4)$$

В зависимости от скорости атомов вероятность двухквантового перехода имеет два резких максимума. В соответствии с этим на уровне 2 возникают два пика в распределении атомов по скоростям с шириной $\Delta v \sim (\gamma/\omega) c$. Из (4) легко найти скорости, находящиеся в резонансе с двухквантовым процессом:

$$v_{\pm} = \frac{\Omega' - \Omega}{\pm \omega' - \omega} c. \quad (5)$$

Эффект насыщения при БКР, очевидно, обусловлен обратными переходами с уровня 2 и определяется изменением заселенности уровня 2. При $\Omega' - \Omega > \gamma$ две противоположно бегущие волны взаимодействуют с различными атомами. При $\Omega' - \Omega \lesssim \gamma$ обе волны взаимодействуют с одними и теми же атомами, т. е. нелинейная поляризация среды, наведенная одной волной, дает вклад в поглощение другой волны на переходе $0 \rightarrow 2$.

Строгое теоретическое рассмотрение в третьем порядке теории возмущений дает следующее выражение для усиления α на переходе $0 \rightarrow 2$.

$$\alpha = \alpha_0 \left\{ 1 - \kappa \left[\phi(\Omega) + \frac{\eta^2 - 1}{4\eta^2} \frac{\gamma_2 \Gamma (\gamma \Gamma + \Omega (\Omega' - \Omega))}{(\Gamma^2 + \Omega^2) (\gamma^2 + (\Omega' - \Omega)^2)} \right] \right\}, \quad (6)$$

где $\phi(\Omega)$ — плавная функция от Ω , имеющая максимум при $\Omega = 0$, равный единице,

$$\kappa = \frac{4|G'|^2}{\gamma_2 \Gamma}, \quad \Gamma = \frac{\gamma_0}{2}, \quad \alpha_0 = \frac{8 \pi^{3/2} N |d_{02}|^2 G^2 \eta^2}{\hbar \bar{v} (\eta^2 - 1) (\Gamma^2 + \Omega^2)}$$

$\eta = \omega' / \omega > 1$, \bar{v} — средне тепловая скорость. Выражение (6) описывает провал как функцию разности расстройок $\Omega' - \Omega$. Амплитуда его зависит от констант релаксации и расстройки частоты Ω . При $\Omega \gg \Gamma$ резонансный провал с шириной γ исчезает. Он не возникает также при $\omega' \leq \lesssim \omega$, так как при любых Ω и Ω' перекрытия областей взаимодействующих атомов не происходит. Кроме того при $\omega' \approx \omega$ линия ВКР вперед оказывается однородно уширенной,

Анализ показывает, что в случае двух стоячих волн на каждом переходе описываемый провал в линии ВКР будет наблюдаться при любых ω' и ω . Учитывая достигнутый прогресс в создании перестраиваемых лазеров, можно заключить, что практически на любом переходе оптического диапазона можно получить генерацию по трехуровневой схеме. Поэтому описываемое здесь явление может играть важную роль в прецизионной спектроскопии оптически запрещенных переходов. Возможно использование этого метода, как и резонанса двухфотонного поглощения, в экспериментах по точному измерению частоты перехода $1S - 2S$ атома водорода, частот колебательно-вращательных переходов, неактивных в инфракрасной области спектра. В некоторых случаях по сравнению с

регистрацией резонанса двухфотонного поглощения описанное явление может иметь преимущество, так как в условиях точного резонанса не требуются мощные источники излучения.

Институт физики полупроводников
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
18 июля 1975 г.

Литература

- [1] Л.С.Василенко, В.П.Чеботаев, А.В.Шишаев. Письма в ЖЭТФ, 12, 161, 1970.
 - [2] Physics Today, Jule, 1974.
 - [3] Г.Е.Ноткин, С.Г.Раутиан, А.А.Феоктистов. ЖЭТФ, 52, 1673, 1967; M.S.Feld, A.Javan. Phys. Rev., 177, 540, 1969; Th. Hänsch, P.Toschek. Zeit f. Physic, 236, 213, 1970; I.M.Beterov, V.F.Cheboetaev. Progress in Quantum Electronics, vol. 3, part 1, 1974, Pergamon Press.
 - [4] И.М.Бетеров, Ю.А.Матюгин, В.П.Чеботаев. Оптика и спектроскопия, 28, 357, 1970.
 - [5] И.М.Бетеров, Ю.А.Матюгин, В.П.Чеботаев. ЖЭТФ, 64, 1495, 1973.
-