

НАБЛЮДЕНИЕ УЗКИХ РЕЗОНАНСОВ В СПЕКТРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА С НЕЛИНЕЙНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ

*С.Н.Багаев, А.К.Дмитриев, Ю.В.Некрасов,
В.М.Семибаламут, Б.Н.Скворцов, В.П.Чеботаев*

Впервые сообщается о прямом наблюдении нового типа резонанса насыщенного поглощения – резонанса в спектре излучения лазера с нелинейным поглощением при условии, когда ширина линии излучения лазера значительно превосходит ширину резонанса. Экспериментально показано, что при низком давлении газа ширина резонанса для колебательных вращательных переходов молекул определяется только столкновительной шириной.

1. Сужение резонансов насыщенного поглощения в газах сопровождается резким падением их интенсивности из-за уменьшения плотности поглощающих частиц и интенсивности насыщенного поля. Это обстоятельство затрудняет регистрацию резонансов с относительной шириной меньше 10^{-11} . Поэтому для прогресса в спектроскопии сверхвысокого разрешения (СВР) необходимы качественно новые физические методы получения резонансов и их регистрации. Другая важная проблема СВР связана с получением перестраиваемого излучения с очень узкой линией (менее 100 Гц). В этой работе мы впервые сообщаем о наблюдении нового типа резонанса насыщенного поглощения – резонанса в спектре излучения лазера с поглощающей средой внутри резонатора. Его ширина соответствует однородной ширине линии. В отличие от известных методов спектроскопии СВР, в которых необходимо применение плавно перестраиваемого одночастотного излучения с узким спектром, в описываемом методе используются лазер, ширина линии излучения которого существенно превосходит ширину резонанса. С его помощью впервые экспериментально исследовано поведение ширины резонанса при низких давлениях газа и показано, что она определяется только столкновениями.

2. Резонанс в спектре излучения лазера с нелинейным поглощением, рассмотренный в ¹, обусловлен резонансной зависимостью насыщенного поглощения и коэффициента преломления в газе в поле стоячей волны. Обычно в нелинейной спектроскопии сверхвысокого разрешения наблюдаются резонансы поглощения и коэффициента преломления (см. ²). Если ширина линии излучения лазера много больше однородной ширины линии поглощения, то наблюдение резонансной зависимости мощности генерации или частоты становится невозможным. Однако при этом в спектре излучения возникают упомянутые выше резонансы. Вблизи центра линии поглощения спектр излучения лазера описывается выражением ¹:

$$S(\Omega) \approx S_0 \left[1 + \frac{k}{1 + (\Omega/\Gamma)^2} \right] \left[1 + q \frac{1 - (\Omega/\Gamma)^2}{\left(1 + \left(\frac{\Omega}{\Gamma} \right)^2 \right)^2} \right], \quad (1)$$

S_0 – спектральная плотность излучения лазера в отсутствие поглощения, $\Omega = \omega - \omega_0$ – расстройка частоты генерации ω от центра линии ω_0 , Γ – однородная полуширина линии. Первый и второй члены соответствуют резонансам поглощения и коэффициента преломления. Коэффициенты k и q определяют контраст резонанса мощности и коэффициент нелинейного затягивания частоты в лазере с нелинейным поглощением (см. ²). Для значения $\Gamma < 10^6$ Гц спектр излучения удобнее исследовать гетеродинным способом (рис. 1) с помощью радиочастотного спектроанализатора. Если ширина линии излучения опорного лазера много меньше однородной ширины 2Γ , наблюдаемый спектр будет соответствовать спектру исследуемого лазера. На рис. 2 показан спектр излучения He – Ne-лазера на $\lambda = 3,39$ мкм с метановым поглотителем. Длина резонатора, усиливающей трубки и поглощающей ячейки были равны соответственно 600, 200 и 400 см. Радиус светового пучка в

ячейке составлял $a = 0,3$ см. Ширина линии излучения лазера составляла ≈ 1 МГц. Резонанс в спектре (рис. 2, а) имеет сложную форму, которая качественно согласуется с описываемой (1). Если сигнал с детектора подавать на спектроанализатор через усилитель-ограничитель, то наблюдаемый в этом случае резонанс в спектре излучения лазера будет обусловлен только нелинейным затягиванием частоты генерации к центру линии поглощения (второй член в (1)). Форма резонанса в спектральном распределении частоты генерации показана на рис. 2, б. Кривая на рис. 2, в, полученная делением кривых на рис. 2, а и 2, б, описывает влияние изменения мощности излучения на спектр лазера (первый член в (1)). Как видно на рис. 2 вклад изменений мощности и коэффициента преломления в резонанс спектра излучения имеет одинаковый порядок величины.

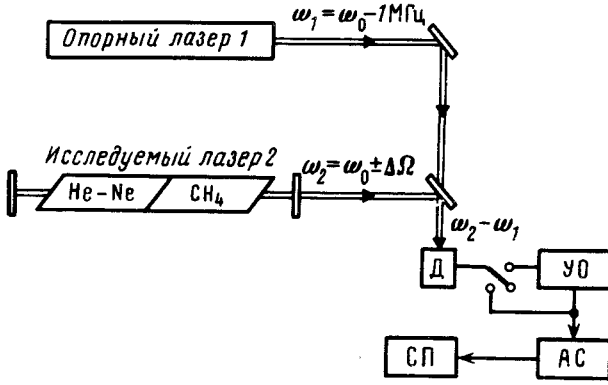


Рис. 1

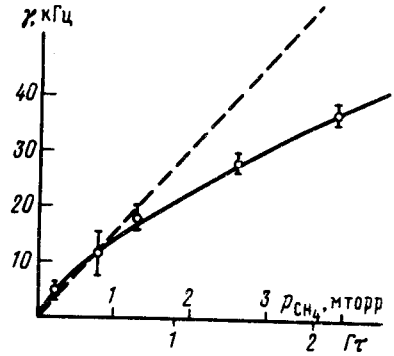


Рис. 3

Рис. 1. Схема наблюдения резонанса в спектре излучения: Д – фотодетектор, УО – усилитель-ограничитель, АС – анализатор спектров, СП – самописец, $\Delta\Omega = 500$ кГц

Рис. 3. Зависимость полуширины резонанса спектра излучения от давления метана (параметра $\Gamma\tau$). Точки – эксперимент, сплошная кривая – теория, пунктирная кривая соответствует ударному уширению резонанса ($\gamma = \Gamma$). $a = 0,31$ см, $\tau = 5,6 \cdot 10^{-6}$ с

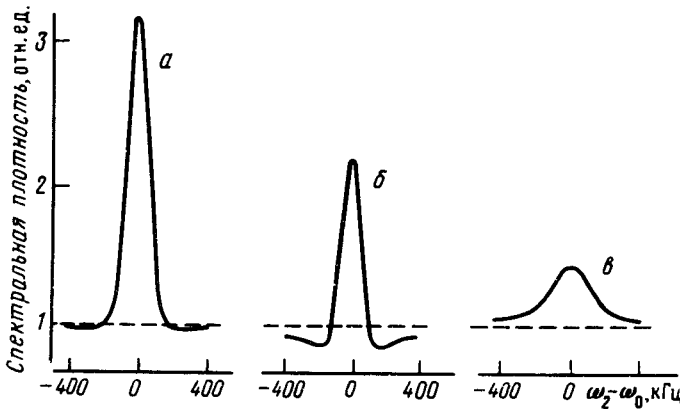


Рис. 2. Формы резонанса в спектре излучения He – Ne/CH₄-лазера в различных режимах записи ($P_{CH_4} = 2$ мторр): а – сигнал биений с выхода фотодетектора подается прямо на анализатор спектра; б – сигнал биений поступает на анализатор спектра через усилитель-ограничитель; в – резонанс мощности

3. Высокая чувствительность метода позволила прямо наблюдать магнитную сверхтонкую структуру линии $F_2^{(2)}$ метана и эффект отдачи, исследовать поведение резонанса при низком давлении газа, когда время пролета $\tau = a/v_0$ частицы со среднетепловой скоростью v_0 через область взаимодействия с полем a значительно меньше обратной полуширины Γ ($\Gamma\tau \ll 1$). В то время как ширина лэмбовского провала зависит от параметра Γ и τ^{3-5} , ширина резонанса спектра, как показал анализ, в области $\Gamma\tau \ll 1$ определяется только ши-

риной 2Г. Аналогичный эффект также был предсказан для ширины производной резонанса насыщения по частоте ⁴ и резонанса в коэффициенте преломления ⁶. Экспериментальное исследование этого явления представляет несомненный интерес, так как открывает возможность получения узких резонансных линий, ширина которых не ограничена пролетным уширением. До сих пор из-за трудностей эксперимента было осуществлено лишь качественное наблюдение "сужения" резонанса ^{7, 8}.

На рис. 3 показана зависимость полуширины резонанса γ в спектре распределения частоты излучения лазера от величины параметра $\Gamma\tau$. Сплошная кривая — расчетная зависимость. Экспериментальные результаты нанесены точками. Численный расчет был выполнен для пучка гауссова профиля с учетом влияния сверхтонкой структуры линии $F_2^{(2)}CH_4$. Параметр $\Gamma\tau$ определялся по известной величине ударного уширения в метане 15 кГц/мторр ⁹ и измеренному радиусу пучка в ячейке. В пределах ошибки измерений получено хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов. В области значений $\Gamma\tau \lesssim 1$ ширина резонанса определяется совместным действием ударного и пролетного уширений. При $\Gamma\tau \lesssim 0,1$ полуширина γ резонанса в спектре излучения прямо связана с однородной полушириной Γ ($\gamma \approx 1,4 \Gamma$), а влияние пролетных эффектов проявляется лишь в изменении наклона уширения от давления. Наблюдаемая величина γ составляла 4 кГц при давлении метана 0,2 мторр, что в пять раз меньше пролетной полуширины для частиц со среднетепловой скоростью. Несмотря на то, что интенсивность резонанса спектра в пролетной области ($\Gamma\tau \ll 1$) уменьшается пропорционально квадрату плотности частиц ($\sim N^2$), высокая чувствительность метода позволила исследовать поведение однородной ширины резонанса при низких давлениях газа.

Таким образом, проведенные исследования показали высокую эффективность нового метода сверхвысокого разрешения. В сочетании с абсолютным измерением частоты при гетеродинном способе регистрации и использованием перестраиваемых по частоте лазеров резонанс в спектре излучения может стать одним из эффективных методов спектроскопии сверхвысокого разрешения при использовании насыщенного поглощения, а также двухфотонных резонансов в разнесенных оптических полях.

Авторы благодарны Е.А.Титову за полезные обсуждения.

Литература

1. Чеботаев В.П. Доклад на II симпозиуме по физике газовых лазеров, Новосибирск, июнь (1975); Квантовая электроника, 1976, 3, 649, Bagayev S.N., Chebotayev V.P., Dmitriyev A.K., Goldort V.G. et al. Appl. Phys., 1976, 10, 231.
2. Letokhov V.S., Chebotayev V.P. Nonlinear Laser Spectroscopy (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1977).
3. Раутиан С.Г., Шалагин А.М. ЖЭТФ, 1970, 58, 952.
4. Бакланов Е.В., Дубецкий Б.Я., Семибаламут В.М., Титов Е.А. Квантовая электроника, 1975, 2, 2508.
5. Семибаламут В.М., Титов Е.А. Квантовая электроника, 1978, 5, 1485.
6. Алексеев В.А., Басов Н.Г., Губин М.А., Никитин В.В., Онищенко Н.С. ЖЭТФ, 1983, 84, 1980.
7. Багаев С.Н., Василенко Л.С., Дмитриев А.К., Скворцов М.Н., Чеботаев В.П. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 399.
8. Алексеев В.А., Басов Н.Г., Губин М.А., Никитин В.В., Никольчин А.В., Петровский В.Н., Проценко Е.Д., Тюриков Д.А. Квантовая электроника, 1984, 11, 648.
9. Багаев С.Н., Бакланов Е.В., Чеботаев В.П. Письма в ЖЭТФ, 1972, 16, 344.