

## О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СИГНАЛА РЕЗОНАНСОВ НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И ДИСПЕРСИИ В МЕТАНЕ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.В. Никульчин, М.А. Губин

*За счет охлаждения метановой поглощающей ячейки до температуры 40 К и использования колебательно-вращательных переходов с первого либо второго вращательного уровня основного колебательного состояния возможно увеличение более чем на два порядка сигналов узких резонансов насыщенного поглощения и дисперсии по сравнению с традиционно используемой в He-Ne/CH<sub>4</sub> лазере линией P(7) полосы ν<sub>3</sub> (λ = 3,39 мкм) при комнатной температуре.*

Повышение точности оптических стандартов частоты (ОСЧ) до  $10^{-14} - 10^{-15}$  связано с развитием методов выделения сверхузких реперных линий с относительной шириной  $\sim 10^{-11} - 10^{-12}$  и снижением сдвига линии из-за квадратичного эффекта Доплера (КЭД). В последние годы приоритет отдается реперным линиям на запрещенных переходах нейтральных атомов или ионов, допускающих глубокое охлаждение лазерным излучением и пространственную локализацию в электромагнитных или световых ловушках /1/. Поскольку для молекул не разработано методов охлаждения резонансным излучением, то дальнейшее развитие ОСЧ на молекулярных переходах при использовании традиционных методов спектроскопии насыщения связано с селекцией из максвелловского скоростного распределения медленных молекул /2/. Использованию данного эффекта для выделения сверхузких резонансов и снижения сдвига из-за КЭД препятствует малая величина наблюдаемого сигнала, поскольку количество медленных молекул, дающих вклад в резонанс, падает пропорционально параметру  $(\gamma\tau)^2 \approx (v_M/v_0)^2 \ll 1$  (где  $\gamma$  — ударная ширина линии;  $\tau$  — время пролета поперек луча среднетепловых молекул, имеющих скорость  $v_0$ ;  $v_M$  — максимальная скорость выделяемых медленных молекул).

Цель настоящей работы — показать, что в случае молекулы метана возможен сравнительно простой способ повышения более чем на два порядка сигнала нелинейных резонансов насыщенного поглощения и дисперсии за счет охлаждения метана до криогенных температур  $T \approx 40$  К. Целесообразность охлаждения связана с двумя особенностями молекулы метана, выделяющими ее среди других, более тяжелых, сферических молекул, используемых в ОСЧ (например, SF<sub>6</sub>, OsO<sub>4</sub>).

Первая заключается в том, что при охлаждении вплоть до  $T \approx 40$  К давление насыщенных паров для метана остается достаточным для работы (табл. 1) /3/.

Константа ударного уширения для колебательно-вращательных переходов полосы ν<sub>3</sub> составляет  $\cong 15$  Гц/мкторр при комнатной температуре. Диапазон давлений  $10^{-5} - 10^{-6}$  торр соответствует ударной ширине резонансов от 15 до 150 Гц, что совпадает с требованием на ширину реперных резонансов, необходимую для создания ОСЧ с точностью и воспроизводимостью частоты  $10^{-14} - 10^{-15}$ .

Т а б л и ц а 1

Зависимость давления насыщенных паров метана от температуры

Давление, торр	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
Температура, К	34,2	36,9	39,9	43,5	47,7	52,9	59,2	67,3	77,7	91,7	115,0

Вторая особенность молекулы состоит в том, что метан имеет наибольшую вращательную постоянную  $B = 5,25 \text{ см}^{-1}$  среди сферических молекул, и благодаря разнице энергий вращательных уровней при  $T \approx 40 \text{ К}$  заселено лишь незначительное их число.

Для оценки величины выигрыша в сигнале при охлаждении воспользуемся результатами /4/, где определены интенсивности переходов при комнатной температуре и их частоты для полосы  $\nu_3$  молекулы  $\text{CH}_4$ . Используя данные /4/, можно вычислить интенсивности линий при  $T = 40 \text{ К}$ . Выигрыш, например, для компоненты E(1) /4/ линии R(2) при  $T = 40 \text{ К}$  по отношению к традиционно используемой в He-Ne/ $\text{CH}_4$  лазере ( $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ )  $F_2^{(2)}$  компоненте линии P(7) при  $T = 300 \text{ К}$  составляет 31,5. При этом принято во внимание то обстоятельство, что для резонансов с однородной шириной 15 – 150 Гц из-за разрешения магнитной сверхтонкой структуры интенсивность  $F_2^{(2)}$  – компоненты линии P(7) примерно в три раза меньше приведенной в /4/. ( $B/4/F_2^{(2)}$  – компонента обозначена как F1(2) либо F2(1) линии P(7).) При сравнении сигнала на E-компоненте линии R(2) при  $T = 40 \text{ К}$  с сигналом на линии P(7) при  $T = 300 \text{ К}$  необходимо также учесть уменьшение доплеровской ширины:  $\Delta\omega_D(300 \text{ К})/\Delta\omega_D(40 \text{ К}) = \sqrt{300/40} \approx 2,7$ , и рост плотности  $n_0$  молекул в рабочем объеме при сохранении той же величины ударного уширения  $n_0(40 \text{ К})/n_0(300 \text{ К}) \sim \sqrt{300/40} \approx 2,7$ .

Амплитуда резонансов насыщенной дисперсии (частотных резонансов) характеризуется коэффициентом автостабилизации частоты S /5/, величина которого совпадает со значением первой производной резонанса на центре линии поглощения. В скоростном приближении /5/

$$S = (\kappa P c l^{(-)}) / 4\pi \Gamma l_0 (\sqrt{1+I} - 1)^2 / \sqrt{1+I},$$

где  $\kappa$  – ненасыщенный коэффициент поглощения метана,  $P$  – давление,  $\Gamma = \gamma + 1/2\pi\tau$ ,  $l^{(-)}$  – длина поглощающей ячейки,  $l_0$  – расстояние между зеркалами резонатора,  $I$  – параметр насыщения.

Все перечисленные механизмы увеличения амплитуды сигналов описываются в формуле сомножителями  $\kappa P$ . Использование переходов R(2), R(1), Q(1) требует применения перестраиваемых лазеров на центрах окраски. Малый размер активной области лазеров на F-центрах по сравнению с He-Ne лазерами позволит в два раза увеличить коэффициент заполнения резонатора  $l^{(-)}/l_0$  при сохранении небольших размеров установки.

Суммарное влияние всех перечисленных факторов приводит к увеличению сигнала в 470 раз для E-компоненты линии R(2) ( $T = 40 \text{ К}$ ) по сравнению с  $F_2^{(2)}$  – компонентой линии P(7) ( $T = 300 \text{ К}$ ).

Совпадение традиционно используемой линии P(7) метана ( $\lambda^{-1} = 2947 \text{ см}^{-1}$ ) с диапазоном генерации He-Ne лазера ( $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ ) является случайным. Поскольку частоты линий R(2), R(1), Q(1) колебательно-вращательной полосы  $\nu_3$  метана сдвинуты на  $60 - 80 \text{ см}^{-1}$  в синюю область относительно частоты этого лазера /4/, то для их наблюдения необходим перестраиваемый лазер, работающий в диапазоне длин волн  $\lambda = 3,28 - 3,34 \text{ мкм}$ .

В настоящее время в указанном диапазоне существуют лазеры на  $F_A$  (II) центрах в кристаллах  $\text{RbCl}:\text{Li}$  с малым порогом возбуждения ( $\approx 50 \text{ мВт}$ , на  $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$ ), выпускаемые фирмой Burliegh (модель FCL-20). Проблема узкого спектра излучения и малой спектральной плотности частотных шумов для этого лазера может быть решена теми же средствами, что и для лазеров на красителях /6/. Двухмодовый режим генерации, удобный для выделения резонансов насыщенной дисперсии в лазерах данного типа, в настоящее время реализован /7/.

Авторы благодарны В.А. Алексею за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Демтредер В. Лазерная спектроскопия. М., Наука, 1985.
2. Багаев С. Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 45, 371 (1987).
3. Хэфер Р. Криовакуумная техника. М., Энергоатомиздат, 1983.
4. Pine A. S. J. Opt. Soc. Am., 66, 97 (1976).
5. Кошелявский Н. Б., Татаренков В. М., Титов А. Н. Квантовая электроника, 1, 516 (1974).
6. Nough J. et al. Appl. Phys., B33, 179 (1984).
7. Баев В. М. и др. Препринт ИАН № 57, М., 1984.

Поступила в редакцию 22 декабря 1988 г.