

## К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛА В ЦЕНТРЕ ЛИНИИ "МОЛЕКУЛЯРНОГО ЗВОНА" В ДВУХРЕЗОНАТОРНОМ МОЛЕКУЛЯРНОМ ГЕНЕРАТОРЕ

А. С. Башкин, А. Н. Ораевский, А. Е. Сахаров

В работах<sup>1,2,3</sup> экспериментально и теоретически исследовалась форма линии "молекулярного звона" во втором резонаторе двухрезонаторного молекулярного генератора в зависимости от расстройки частоты первого резонатора, работавшего в режиме генерации на переходе  $J = K = 3$   $N^{14}H_3$ . Полученный экспериментально провал в центре линии "молекулярного звона"<sup>1,2</sup> при больших напряжениях на сортирующей системе объяснялся<sup>3</sup> существованием насыщения в первом резонаторе, а отсутствие провала при малых напряжениях связывалось с отсутствием насыщения. Лишь в одной работе<sup>4</sup> провал был обнаружен и при малых напряжениях на сортирующей системе. Он интерпретировался как разрешение структуры главной линии перехода, состоящей из трех компонент (интенсивность одной очень мала)<sup>5</sup>.

В данной работе теоретически и экспериментально исследуется форма центра линии "молекулярного звона" при различных режимах работы молекулярного генератора. Показано, что в центре однородно уширенной линии при работе двухрезонаторного молекулярного генератора в режиме спектроскопа появляется провал, физика образования которого в корне отличается от случая лэмбовского провала в неоднородно уширенной линии.

Комплексная амплитуда поля во втором резонаторе, усредненная по его длине, выражается следующей формулой

$$E_2 = Z_{\text{эф}}^{-1} \left\langle \frac{|\mu|^2 \mathcal{E}_1 N v_z}{\hbar \gamma_1^2 l_2 (-i\delta)} \exp(-i\delta T) \left[ \exp(-i\delta \tau_2) - 1 \right] \times \right. \\ \left. \times \left\{ \delta (\cos \gamma_1 \tau_1 - 1) + i \gamma_1 \sin \gamma_1 \tau_1 \right\} \right\rangle_v, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{эф}} = Z'_{\text{эф}} + iZ''_{\text{эф}}$  - эффективное комплексное сопротивление резонатора,  $\gamma_1 = \sqrt{\delta^2 + |\mu|^2 \mathcal{E}_1^2 / \hbar^2}$ ,  $\delta = \omega_{\text{аб}} - \omega_1$ ,  $\omega_{\text{аб}}$  - частота перехода,  $\omega_1$ ,  $l_1$ ,  $\tau_1$ ,  $\mathcal{E}_1$  - соответственно частота, длина, время пролета молекулой и амплитуда поля в первом резонаторе,  $\tau_2$ ,  $T$  - соответственно время пролета второго резонатора длиной  $l_2$  и расстояния  $L$  между резонаторами,  $N$  - плотность активных молекул во втором резонаторе,  $|\mu|$  - матричный элемент дипольного момента молекулы; знак  $\langle \rangle_v$  означает усреднение по скоростям.

Распределение молекул в единице объема источника молекулярного пучка по компонентам скорости  $v_r$  и  $v_z$  в цилиндрических координатах имеет вид

$$N(v_r, v_z) dv_r dv_z = \frac{4Nv_r}{\sqrt{\pi}\alpha^3} \exp(-v^2/\alpha^2) dv_r dv_z, \quad (2)$$

где  $\alpha = \sqrt{2kT/m}$  - наиболее вероятная скорость. При применении источника в виде отверстия в тонкой стенке это распределение плотности будет сохраняться вдоль оси  $z$ . Из формул (1,2) следует, что экспоненциальные функции вида  $\exp(a/v_z)$  необходимо усреднять по выражению  $F(v_z) = v_z \exp(-v_z^2/\alpha^2) dv_z$ .

Поскольку нас интересует поведение формы линии "молекулярного звона" при малых расстройках  $\delta$  от вершины и отсутствии насыщения, можно с хорошим при-

ближением интегрирование по скорости  $v_z$  проводить в интервале от  $\alpha/2$  до  $\infty$  для  $\delta < 300$  гц (при этом экспоненциальные функции в выражении (1) разлагаются в ряд). Тогда для квадрата амплитуды поля во втором резонаторе получим

$$|E_2|^2 \sim \frac{4\alpha^4 + \delta^2 \alpha^2 [4(2L - 1_1)^2 + 1_2(41_2 + 6L - 31_1)]}{(Z'_{эф})^2 + (Z''_{эф})^2}. \quad (3)$$

Аналогичная по зависимости от расстройки  $\delta$  формула получается и при больших насыщениях.

Эффективное комплексное сопротивление второго резонатора при малых расстройках  $\delta$  и  $\omega_2 = \omega_1$  выражается формулой

$$Z_{эф} = -\frac{8\sqrt{\pi}|\mu|^2 \delta 1_2 N D v_{кр}^2}{3\hbar \alpha^4} - i \left\{ \frac{1}{Q} - \frac{4\sqrt{\pi}|\mu|^2 1_2 N D v_{кр}^2}{\hbar \alpha^3} \right\}, \quad (4)$$

где  $v_{кр}$  - максимальная радиальная скорость активных молекул в пучке,  $D$  - величина, пропорциональная разности числа молекул на верхнем и нижнем уровнях на входе во второй резонатор,  $\omega_2$  - частота второго резонатора,  $Q$  - его добротность. При насыщении в первом резонаторе или малых пучках величина  $ND \rightarrow 0$ . Поэтому,  $Z_{эф} \approx -i/Q$  и в центре линии "молекулярного звона" (формула (3)) будет провал. В случае большой регенерации во втором резонаторе  $Z_{эф} \sim \delta$ , поэтому провала не будет.

Следовательно, проведенные расчеты показывают, что провал в форме линии "молекулярного звона", обусловленный интерференцией излучения отдельных молекул, должен появляться и при малых пучках и отсутствии насыщения. Возникает вопрос, почему провал не наблюдается в форме линии в первом резонаторе? Дело в том, что в этом случае все молекулы излучают в одной и той же фазе, задаваемой извне внешним источником подсветки. Во втором же резонаторе имеет

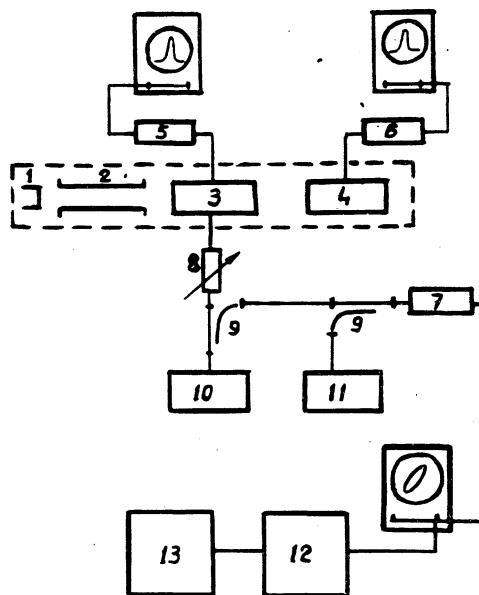
место когерентное спонтанное высвечивание активных молекул, фаза излучения которых зависит от скорости. Сложение колебаний с различными фазами и определяет появление узкого провала в форме однородно уширенной линии.

Для проверки расчетов был проведен эксперимент (рис. 1). В качестве спектроскопа использовался двухрезонаторный молекулярный генератор (1 - 4), работающий на переходе  $J = K = 3$   $N^{14}H_3$ . Длина резонаторов была  $I_1 = 6$  см,  $I_2 = 8$  см, расстояние между ними могло меняться от 2,5 см до 10,5 см. Для подсветки первого резонатора использовался молекулярный генератор (10). Контроль уровня мощности колебаний в первом резонаторе осуществлялся с помощью приемника (5). Этот уровень поддерживался постоянным при измерениях аттенюатором (8). Частота генератора подсветки отсчитывалась относительно опорного молекулярного генератора (11) частотомером Ф 519 (13).

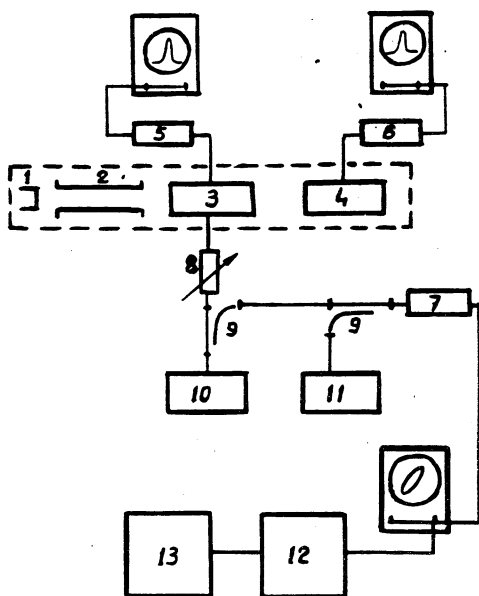
На рис. 2,3 представлены полученные результаты. Из зависимости формы "молекулярного звона" от расстояния между резонаторами можно проследить образование провала и изменение его ширины при больших насыщениях и при отсутствии насыщения. Видно, что с увеличением расстояния глубина провала увеличивается, а его ширина - уменьшается. Этот эффект является следствием интерференции излучения отдельных молекул<sup>3</sup>.

Асимметрию формы линии можно качественно объяснить, исходя из неравенства амплитуд двух компонент структуры главной линии (для количественного совпадения необходимо, чтобы расстояние между компонентами не превышало 300 гц, на самом же деле оно равно  $1586 \pm 80$  гц<sup>6</sup>).

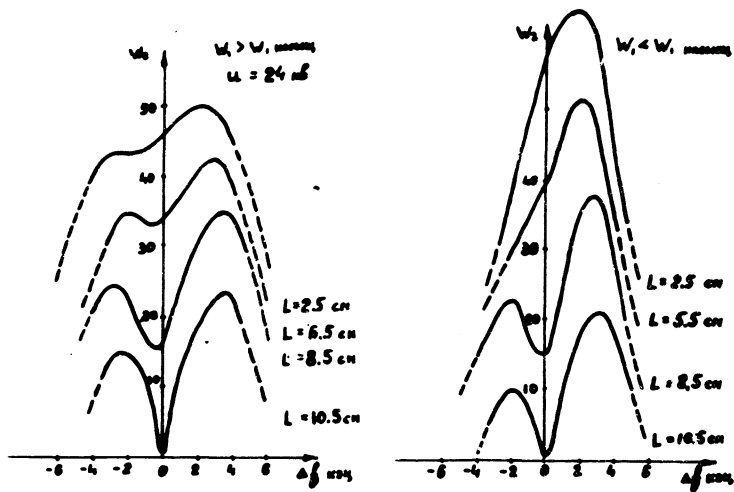
При рассмотрении зависимости формы линии "молекулярного звона" от давления в источнике молекулярного пучка (рис. 3) видно исчезновение провала при больших давлениях. Это можно объяснить значитель-



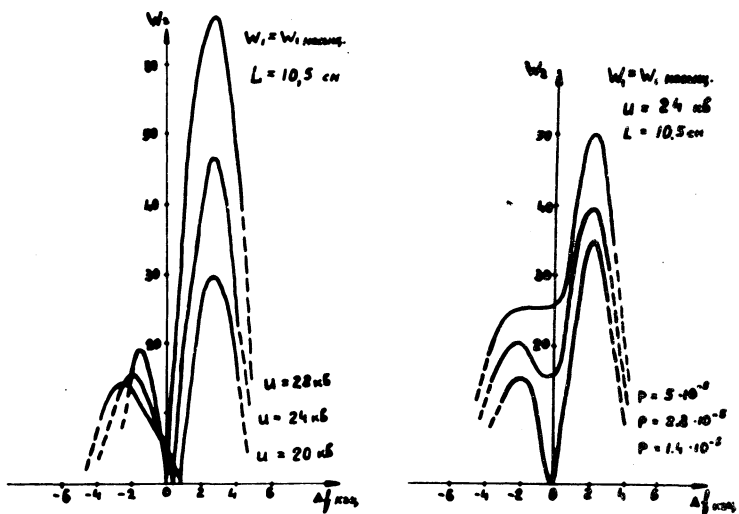
Р и с. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 - источник молекулярного пучка, 2 - сортирующая система, 3 - первый резонатор спектроскопа, 4 - второй резонатор спектроскопа, 5 - приемник для измерения амплитуды сигнала в первом резонаторе, 6 - приемник для измерения амплитуды сигнала во втором резонаторе, 7 - приемник для измерения частоты сигнала подсветки, 8 - аттенюатор, 9 - направленный ответвитель, 10 - молекулярный генератор для подсветки, 11 - опорный молекулярный генератор, 12 - звуковой генератор, 13 - частотомер.



Р и с. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 - источник молекулярного пучка, 2 - сортирующая система, 3 - первый резонатор спектроскопа, 4 - второй резонатор спектроскопа, 5 - приемник для измерения амплитуды сигнала в первом резонаторе, 6 - приемник для измерения амплитуды сигнала во втором резонаторе, 7 - приемник для измерения частоты сигнала подсветки, 8 - аттенюатор, 9 - направленный ответвитель, 10 - молекулярный генератор для подсветки, 11 - опорный молекулярный генератор, 12 - звуковой генератор, 13 - частотомер.



Р и с. 2. Зависимость формы линии "молекулярного звона" от расстояния между резонаторами  $L$  при насыщении и отсутствии насыщения в первом резонаторе.



Р и с. 3 Зависимость формы линии "молекулярного звона" от давления в источнике молекулярного пучка, типа канала и напряжения на сортирующей системе.

ным отклонением при больших давлениях распределения молекул по скоростям на выходе примененного источника в виде канала длиной 10 мм и диаметром 1 мм от соответствующего распределения для отверстия в тонкой стенке.

В работе был обнаружен эффект резкого сужения провала с увеличением напряжения на сортирующей системе (до  $\sim 700$  гц при  $L = 10,5$  см). Сдвиг вершины провала с изменением напряжения возникает из-за различной сортировки молекул обеих компонент спектральной линии и, следовательно, изменения их относительной интенсивности. Интерпретация провала, как разрешения структуры главной линии перехода при уменьшении напряжения на сортирующей системе<sup>4</sup>, когда уменьшается и средняя скорость молекул в пучке, по-видимому, неверна. Провал у нас наблюдался и при максимальных напряжениях на сортирующей системе.

Представляет интерес рассмотрение поведения формы линии "молекулярного звона" в двухрезонаторном пучковом лазере оптического диапазона. В этом случае можно ожидать, что лэмбовский провал в неоднородно уширенной линии, обусловленный однородным уширением, будет иметь в центре сверхузкую линию.

Поступила в редакцию  
16 июня 1970 г.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. М. Страховский, В. М. Татаренков. ЖЭТФ, 42, 907 (1962).
2. Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, Г. М. Страховский, В. М. Татаренков. ЖЭТФ, 45, 1768 (1963).
3. Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, А. В. Успенский. Оптика и спектроскопия, 23, 923 (1967).
4. D. C. Laine, A. L. Smith. Phys. Letters, 20, 374 (1966).
5. K. Shimoda. J. Phys. Soc. Japan, 12, 1006 (1957).
6. А. Ф. Крупнов, В. А. Скворцов, Л. А. Синегубко. Изв. вуз., Радиофизика, 10, 142 (1967).