

**ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СКАНИРУЮЩЕГО
СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА РАД С ПОМОЩЬЮ
КВАЗИОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА**

В. П. Казаков, В. В. Паршин, Ю. А. Дрягин

При исследовании слабоинтенсивных молекулярных линий (с коэффициентом поглощения $\alpha_{\max} \leq 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ см}^{-1}$), а также при абсорбционном спектральном анализе высокочистых веществ становится актуальной задача повышения чувствительности субмиллиметрового спектрометра.

Известно [1], что эффективным способом повышения чувствительности сканирующего спектрометра РАД является увеличение мощности пронизывающей ячейку излучения. Однако в субмиллиметровом диапазоне длин волн уровень мощности традиционно применяемых в газовой спектроскопии источников невысок — порядка 10 мВт [2], так что исследование слабоинтенсивных спектральных линий становится невозможным. Одним из способов повышения мощности, эффективно взаимодействующей с исследуемым газом, является создание резонанса в поглощающей ячейке [3–6].

В настоящей работе исследовалась возможность повышения чувствительности субмиллиметрового спектрометра РАД с помощью квазиоптического резонатора. Для спектрометра РАД любое увеличение мощности, поглощенной газом в ячейке, и более эффективное преобразование в акустический сигнал будет увеличивать чувствительность.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Мощность источника излучения ЛОВ (1) поступала через волноводный рупор в резонаторную ячейку (2) с акустическим детектором (3). Оптический столик (4) позволял юстировать ось резонатора относительно рупора ЛОВ и подстраивать КСВ волноводного тракта. Для снижения акустических помех ячейки поглощения с акустическим детектором (например низкочастотных вибраций, близких к частоте модуляции $\omega = 180 \text{ Гц}$ и т. д.)

была разработана амортизация с многоступенчатыми низкочастотными фильтрами (5, 6, 7). Резонатор возбуждался волноводным рупором, заканчивающимся плавным переходом на отверстие связи в центре плоского зеркала. В рассматриваемом квазиоптическом резонаторе длиной $l=130$ мм отношение диаметра отверстий связи (0,5—3) мм к диаметру зеркал 36 мм изменялось в пределах 0,014—0,1.

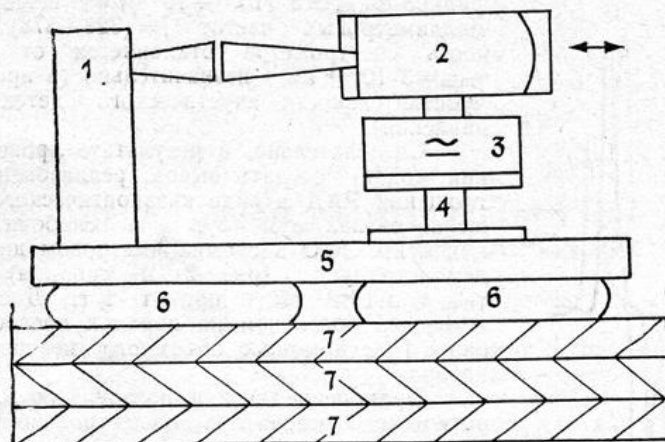


Рис. 1.

Экспериментальные исследования, выполненные на описанной установке, проводились на слабоинтенсивных линиях молекулы закиси азота N_2O в возбужденных колебательных состояниях 001, 200, 040, 030 и линии микропримеси фосфина PH_3 в германе GeH_4 в диапазоне частот $f=(200 \div 500)$ ГГц. Часть результатов, полученных на ячейке РАД в виде квазиоптического резонатора, представлена на рис. 2, 3 и в таблице. На рис. 2 представлена запись участка спектра перехода $J=14 \leftarrow 13$ молекулы N_2O , полученная в сканирующем режиме при настройке в резонанс по линии $03^{1d}0$ с коэффициентом поглощения $\alpha_{\max} \approx 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ ($\gamma_{\min} \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-1}$, $\tau \sim 1 \text{ с}$, $T \approx 300 \text{ К}$, $P \approx 0,8 \text{ Тор}$). Отдельно показаны (значком *) слабоинтенсивные линии в возбужденных колебательных состояниях 00^01 с $\alpha_{\max} \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ и 20^00 с $\alpha_{\max} \approx 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ при тех же экспериментальных условиях ($\gamma_{\min} \approx 4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-1}$). Ранее [7] при исследовании вращательного спектра N_2O не удавалось наблюдать слабоинтенсивные линии 00^01 и 20^00 (см. обзорную запись спектра N_2O на рис. 1 в работе [7]). На представленном рис. 2 * линии 00^01 и 20^00 наблюдаются с $S/N > 100$, что наглядно демонстрирует возросшую чувствительность спектрометра.

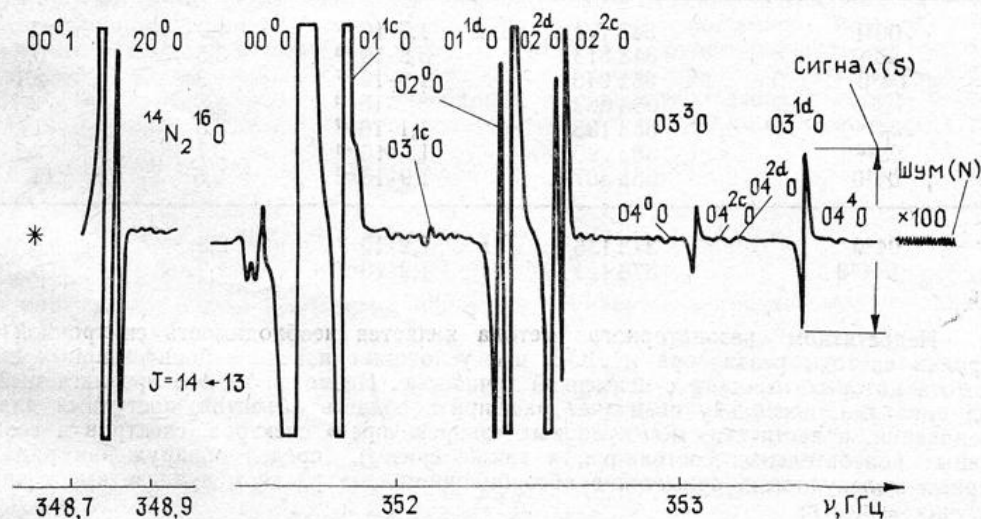


Рис. 2.

Однако резонаторный метод ограничивает возможность наблюдения слабых линий, расположенных на крыльях интенсивных переходов. С целью выяснения области ограничений дополнительно был выполнен эксперимент, который показал, что при давлении $P \approx 0,8 \text{ Тор}$ поглощение в крыльях перехода $J=14 \leftarrow 13$ молекулы N_2O уже при расстройке от центра линии 00^00 с $\alpha_{\max} \sim 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ около 300—400 МГц позволяло наблюдать линии с $\alpha_{\max} \sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$. Таким образом, диапазон исследований слабоинтенсивных линий с предельной чувствительностью резонаторной ячейки РАД остается достаточно широким. Кстати, устранить вклад от сплошного электродипольного поглощения можно, например, введением модуляции длины резонатора или при-

менением штарковской модуляции. Далее, если предельная чувствительность ограничивается вкладом от крыльев линий, то в эксперименте должна наблюдаться квадратичная зависимость ложного отклика от крыла при изменении давления (или соответственно ширины). Из экспериментальных данных, приведенных в таблице, нетрудно заметить, что при изменении давления N_2O от 0,8 до 5 Тор на слабоинтенсивных линиях с коэффициентом поглощения, изменяющихся в пределах двух порядков $\alpha_{\max} \approx 3 \cdot (10^{-6} \div 10^{-8}) \text{ см}^{-1}$ в широкой области субмиллиметровых частот $f = (328 \div 378) \text{ ГГц}$, чувствительность спектрометра отклоняется от среднего значения $\gamma_{\min} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-1}$ незначительно (в пределах зависимости чувствительности акустического детектора от величины давления).

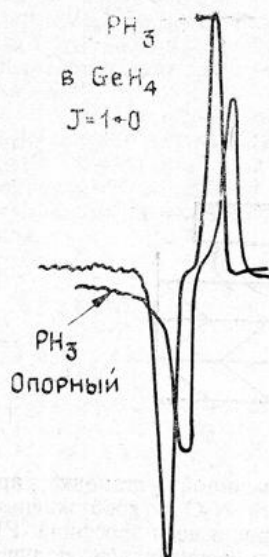


Рис. 3.

Следовательно, в результате проведенных исследований можно сделать вывод: реализованное на ячейке поглощения РАД в виде квазиоптического резонатора отношение сигнал/шум (S/N) на слабоинтенсивных линиях молекулы N_2O в субмиллиметровом диапазоне длин волн демонстрирует (рис. 2 и таблица) чувствительность $\gamma_{\min} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-1}$ при $\tau \sim 1 \text{ с}$. Достигнутая чувствительность более чем на порядок превосходит полученную ранее [6] с помощью объемного неперестраиваемого резонатора.

Применение ячейки поглощения РАД в виде квазиоптического резонатора в спектральном анализе позволит определять концентрации микропримеси фосфина PH_3 до $5 \cdot 10^{-6} \%$ мольн. в высокочистых образцах германа GeH_4 , являющихся сырьем при производстве сверхчистых материалов микроэлектроники (на рис. 3 представлены результаты, когда $S/N > 100$, концентрация $PH_3 \sim 10^{-3} \%$ мольн., $\tau \sim 1 \text{ с}$).

Чувствительность субмиллиметрового спектрометра РАД можно повысить оптимизацией связи разработанной ячейки, улучшением качества отражающих поверхностей и конфигурации резонатора.

Таблица

Идентификация	Экспериментальная частота, МГц	$\alpha_{\max}^{\text{расч}} \cdot 10^{11}, \text{ см}^{-1}$	$\gamma_{\min}^{\text{эксп}} \cdot 10^{11}, \text{ см}^{-1}$	$P, \text{ Тор}$
03 ^{1d} 0	328 157	$1,4 \cdot 10^{-6}$	3,3	2,1
00 ⁰ 1	348 771	$1,7 \cdot 10^{-7}$	4,9	1
20 ⁰ 0	348 813	$3,2 \cdot 10^{-8}$	3,5	0,8
04 ⁰ 0	352 946	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,3	2,1
03 ³ 0	353 063	$3,2 \cdot 10^{-6}$	2,3	2,1
04 ^{2e} 0	353 133	$1,1 \cdot 10^{-7}$	3,5	1
03 ^{1d} 0	353 390	$1,7 \cdot 10^{-6}$	2,7	2,1
04 ⁴ 0	353 507	$1,9 \cdot 10^{-7}$	3,5	1
04 ⁰ 0	378 136	$1,2 \cdot 10^{-7}$	2,3	5
04 ^{2d} 0	378 421	$1,2 \cdot 10^{-7}$	2,2	5

Недостатком резонаторного метода является необходимость синхронной подстройки частоты резонатора и ЛОВ, что усложняет поиск слабоинтенсивных линий, частота которых известна с невысокой точностью. Несмотря на это предлагаемый метод оправдан, поскольку позволяет расширить область объектов, доступных для исследований, в частности, молекулярных «запрещенных» спектров, спектров в возбужденных колебательных состояниях, а также снизить предел обнаружения ряда полярных молекулярных примесей в абсорбционном спектральном анализе высокочистых летучих веществ.

Авторы выражают признательность А. Ф. Крупнову за постановку задачи и полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С. П., Буренин А. В., Герштейн Л. И., Королихин В. В., Крупнов А. Ф. — Оптика и спектроскопия, 1973, 35, вып. 2, с. 295.
2. Голант М. Б., Алексеенко З. Т., Кротова З. С., Лункина Л. А., Негирев А. А., Реброва Т. Б., Савельев В. С., Петрова О. В. — ПТЭ, 1969, № 3, с. 231.
3. Рудин Р. Л. — Оптика и спектроскопия, 1968, 24, вып. 4, с. 602.
4. Helms D., Gordy W. — J. Molec. Spectr., 1977, 66, № 2, p. 206.

5. Goldan P. D., Goto K. — J. Appl. Phys., 1974, 45, № 10, p. 4350.
6. Казаков В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 7, с. 877.
7. Andreev B. A., Burenin A. V., Karyakin E. N., Krupnov A. F., Shapin S. M. — J. Molec. Spectr., 1976, 62, p. 126.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
25 апреля 1985 г.
