

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИКРОВОЛНОВЫХ СПЕКТРОСКОПОВ

И.И. Антаков, С.П. Белов, Л.И. Герштейн, В.А. Гинцбург,
А.Ф. Крупнов, Г.С. Паршин

В работе сообщается о первом применении источников мощного когерентного излучения (до 10^3 вт) на резонансной частоте наблюдающейся спектральной линии газа в радиоспектроскопе с акустическим детектором. Получена чувствительность $(1+2) \cdot 10^{-11}$ см⁻¹ в диапазоне 34 Гц. Метод применим в субмиллиметровой области.

1. Ранее была указана возможность значительного увеличения чувствительности микроволновых спектроскопов (в том числе в миллиметровой и субмиллиметровой областях) путем применения источников с большими мощностями излучения на резонансных частотах наблюдающихся линий и акустического детектирования [1, 2]. Максимальная мощность сигнала, которую можно получить при наблюдении спектрального перехода в веществе, т. е. максимальная поглощаемая газом мощность, равна

$$P_c \sim \frac{1}{2} n h \nu \Delta \nu, \quad (1)$$

где n — разность населенностей уровней, ν — частота перехода, $\Delta \nu$ — однородная ширина линии. Такая мощность сигнала достигается при пропускании через образец резонансного индуцирующего переходы излучения с интенсивностью, достаточной для насыщения перехода

$$P_0 \sim \frac{3h^2(\Delta \nu)^2 c}{8\pi |\mu_{ij}|^2} S, \quad (2)$$

где $|\mu_{ij}|^2$ — квадрат матричного элемента дипольного момента перехода, S — сечение образца. Естественным путем увеличения сигнала от линий является увеличение P_0 и $\Delta \nu$. Для увеличения чувствительности спектроскопа нужно, чтобы увеличение мощности излучения не сопровождалось соответствующим увеличением шумов приемника сигнала от линий. Именно это достижимо в принципе в радиоспектроскопе с акустическим детектором (РАД), который относится, по введенной в [2] классификации, к спектральным приборам, у которых результат взаимодействия излучения с веществом регистрируется по изменению параметров вещества, а не излучения. В настоящей работе описано практическое исследование возможностей увеличения чувствительности спектроскопов путем увеличения мощности резонансного излучения. В качестве источника мощного когерентного излучения использовался МЦР — генератор [3] — "мазер на циклотронном резонансе" диапазона 34 Гц.

2. Линии поглощения в газе наблюдались при амплитудной модуляции мощности излучения МЦР, которое пропускалось через ячейку РАД с окнами из тонкой слюды и направлялось затем в калориметр, являвшийся согласованной нагрузкой. Частота модуляции равнялась 180 гц. Для защиты микрофона РАД от воздействия СВЧ мощности канал, соединяющий ячейку с микрофоном, был выполнен в виде пакета заперделанных волноводов. Ввиду ограниченности пределов перестройки имевшегося МЦР выбор объектов исследования был в значительной мере ограничен. В частности, наблюдалась линия $\nu_{15} - \nu_{16}$ муравьиной кислоты НСООН на частоте 34 378,86 Мгц, коэффициент поглощения которой в чистых парах НСООН равнялся $\gamma_0 = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$, а матричный элемент перехода близок к 0,1 дебая. Ширина линии выбиралась достаточно большой, чтобы исключить насыщение вплоть до мощностей порядка 10^3 вт и равнялась, по измерениям, 70 Мгц по уровню половинной интенсивности. Уширение производилось добавлением стороннего газа, в качестве которого использовался $\text{N}_2\text{O}^{1)}$. Уменьшение коэффициента поглощения линий НСООН из-за разбавления N_2O определялось по отношению выходных сигналов от известных линий N_2O и НСООН в диапазоне 300 Ггц, наблюдавшихся в той же ячейке до и после эксперимента с МЦР. Коэффициент ослабления был найден равным $1,54 \cdot 10^{-2}$, т. е. коэффициент поглощения наблюдавшейся линии $\nu_{15} - \nu_{16}$ при разбавлении равнялся $\gamma = 8,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$.

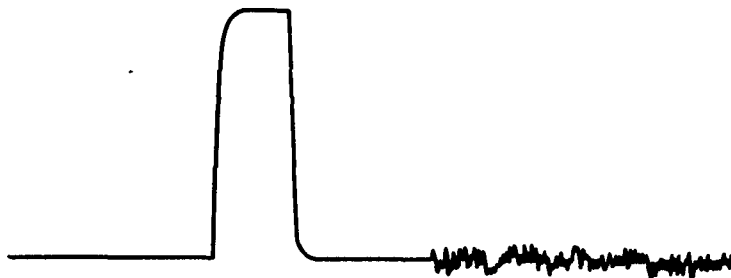


Рис. 1. Сигнал от линии $\nu_{15} - \nu_{16}$ НСООН, наблюдавшейся с помощью РАД и МЦР. Коэффициент поглощения линии $8,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ (НСООН разбавлена N_2O), мощность излучения 10^3 вт , шумы записаны при увеличенном в 100 раз коэффициенте усиления, постоянная времени при записи 1 сек

На рис. 1 показана величина сигнала РАД на центре линии $\nu_{15} - \nu_{16}$ разбавленной НСООН при мощности излучения МЦР 10^3 вт , а также шумы приемной части РАД при увеличенном в 100 раз усилении (модуляция выключена). Величина шума не зависела от наличия или отсутствия проходящего через ячейку излучения МЦР; величина же сигнала от линии возрастала пропорционально мощности излучения (рис. 2). Кроме

¹⁾ Большие концентрации НСООН неблагоприятно действуют на лавсановую мембрану микрофона РАД; кроме этого, уменьшение коэффициента поглощения предотвращало перегрузку приемной аппаратуры.

резонансного сигнала от спектральной линии наблюдался также меньший сигнал нерезонансного характера, природа которого в настоящее время не выяснена. Выделение только резонансной части сигнала легко осуществить при частотной, а не амплитудной модуляции излучения [1 - 3]. Отношение величины сигнала к величине среднеквадратичного отклонения от шума, определенное из рис. 1, равняется ≈ 6000 , т. е. чувствительность РАД в наших опытах при мощности МЦР 10^3 *вт* составила около $(1 + 2) \cdot 10^{-11}$ *см*⁻¹, что более чем на порядок превосходит чувствительность микроволновых спектрометров обычного типа в этом диапазоне [4].

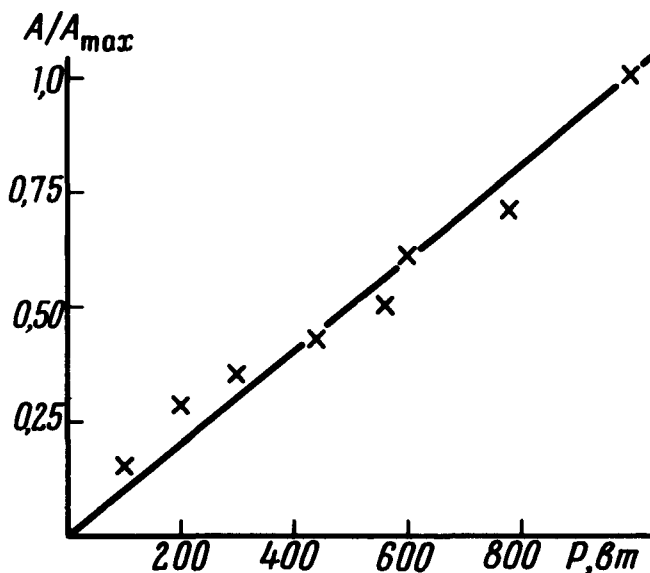


Рис. 2. Зависимость величины сигнала на линии $\delta_{15} - \delta_{16}$ НСООН от мощности излучения МЦР в относительных единицах.

3. Таким образом, экспериментально подтверждена указанная ранее возможность превышения с помощью РАД и мощных источников излучения чувствительности обычных микроволновых спектрометров. Практически такой метод повышения чувствительности приложим не ко всем спектрам; лучше всего применим он в случае редких спектральных линий с весьма малым матричным элементом дипольного момента перехода. С другой стороны, использование впервые больших мощностей излучения на частоте наблюдающейся спектральной линии открывает новое поле исследований в микроволновой спектроскопии: можно исследовать нелинейные эффекты, как, например, наблюдать вращательные спектры неполярных молекул, приобретающих дипольный момент за счет поляризации электрическим полем (расчет будет опубликован отдельно) и т. д. Хорошим объектом исследования могут явиться "запрещенные" спектры [5]. Описанный "силовой" метод увеличения чувствительности является, по-видимому единственным в настоящее время путем получения столь же высокой чувствительности в субмиллиметровой и дальней инфракрасной областях спектра, поскольку чувствительность РАД

не зависит от частоты, и имеются мощные (хотя пока почти не перестраиваемые) источники излучения (см., например [6]). Отметим, что полученная чувствительность на три порядка ниже теоретической [2], что указывает на перспективность дальнейшего развития в этом направлении.

Авторы благодарят А.В.Гапонова, В.А.Флягина и В.К.Юлпатова за постоянное внимание к работе.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
8 апреля 1974 г.

Литература

- [1] А.Ф.Крупнов, Л.И.Герштейн, В.Г.Шустров, С.П.Белов. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 13, 1403, 1970; С.П.Белов, А.В.Буренин, Л.И.Герштейн, В.П.Казаков, Е.Н.Карякин, А.Ф.Крупнов. Письма в ЖЭТФ, 18, 285, 1973.
 - [2] С.П.Белов, А.В.Буренин, Л.И.Герштейн, В.В.Королихин, А.Ф.Крупнов. Оптика и спектроскопия, 35, 295, 1973.
 - [3] А.В.Гапонов, М.И.Петелин, В.К.Юлпатов. Изв. высш. уч. зав. сер. Радиофизика, 10, 1414, 1967.
 - [4] Ч.Таунс, А.Шавлов. Радиоспектроскопия М., ИИЛ, 1959; MRR Spectrometer, Hewlett-Packard, Jan 1970; H.W.Harrington, I.R.Hearn, R.F.Kanskolb, Hewlett-Packard Journal, 22, 2, 1971.
 - [5] K.Fox. Phys. Rev. Lett., 27, 233, 1971; J.K.A.Watson, J.Mol. Spectr., 40, 536, 1971.
 - [6] T.A.De Temples, T.K.Plant, P.D.Coleman. Appl. Phys. Lett., 22, 644, 1973.
-