

вочника [2] зависимость концентрации N растворенного в воде кислорода от температуры T при атмосферном давлении. Сопоставление этих кривых показывает, что существует пропорциональность между величиной $1/Q$ и концентрацией растворенного в воде кислорода N (см. рис. 3).

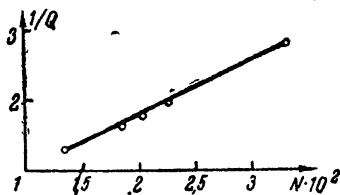


Рис. 3. Зависимость относительной величины поглощения Q от концентрации кислорода N , растворенного в воде.

Полученный результат показывает, что имеется возможность измерять концентрацию растворенного в воде кислорода, используя метод Завойского для наблюдения парамагнитного резонансного поглощения в специальном угольном датчике. В то время как существующие методы определения концентрации растворенного в воде кислорода являются очень трудоемкими и не могут служить для непрерывного наблюдения за изменяющейся концентрацией, предлагаемый метод измерения концентрации растворенного кислорода может найти широкое применение при самых различных исследованиях (например, при изучении процессов кислородообмена, связанных с жизнедеятельностью живых организмов, при некоторых технологических процессах и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Кичигин, Парамагнитный газоанализатор, Доклад на юбилейной сессии АН УССР, посвященной 100-летию со дня рождения А. С. Попова, М., 1959.
2. Д. Кей, Т. Лэби, Справочник физика-экспериментатора, ИЛ, М., 1949.

Харьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
12 мая 1959 г.

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРИЕМА СЛАБЫХ СВЧ СИГНАЛОВ

Я. И. Ханин

Недостатком трехуровневых масеров является то обстоятельство, что для их работы существенно необходим достаточно мощный источник колебаний с частотой, превышающей усиливаемую. Это ограничивает перспективы продвижения таких усилителей в более высокочастотный диапазон. Поэтому представляет интерес рассмотрение других, свободных от указанного недостатка, возможностей использования молекулярных систем с тремя уровнями для целей приема.

Рассмотрим парамагнетик, в системе спиновых уровней которого при наложении постоянного магнитного поля имеются подходящие три уровня E_1 , E_2 и E_3 , связанные разрешенными переходами с частотами $\nu_{12} < \nu_{23} < \nu_{13}$ *. Магнитная восприимчивость χ_{ik} на любой из этих частот оказывается зависящей от наличия в объеме образца колебаний магнитного поля с другими резонансными частотами [1, 2] (на этом обстоятельстве основан принцип действия масера). Помещая такой парамагнетик в резонатор, одновременно настроенный на частоты ν_{13} и χ_{12} , и измеряя χ_{12} (действительную (χ'_{12}) или мнимую (χ''_{12}) компоненту), можно судить о величине P_{13} — подводимой к резонатору мощности, т. е. по измерениям на некоторой частоте фиксировать более высокочастотное излучение. В отличие от масера здесь вспомогательной служит более низкая частота**.

* В дальнейшем все величины, относящиеся к этим частотам, будем писать с теми же индексами.

** Возможны и другие варианты использования трехуровневых систем для целей приема. Например, в [6, 7] рассматривается случай, когда ν_{13} лежит в оптической части спектра, а ν_{12} — в радиодиапазоне. Подобные спектры наблюдаются у паров некоторых металлов в магнитном поле. Освещая пары резонансным светом, можно по переизлученному свету судить о величине колебаний с частотой ν_{12} .

Найдем связь между χ''_{12} и P_{13} . В работе [2] приведено следующее выражение для χ''_{12} :

$$\chi''_{12} = 2\mu_{12}^2 S_1/h. \quad (1)$$

Отсюда следует очевидное соотношение:

$$\Delta\chi''_{12} = 2\mu_{12}^2 \Delta S_1/h, \quad (2)$$

где $\Delta S_1 = S_1(0) - S_1(P_{13})$ — разность значений S_1 при $P_{13} = 0$ и конечном P_{13} . В соотношениях (1)–(2) S_1 является решением системы алгебраических уравнений [3]. Опуская промежуточные преобразования, приведем окончательный результат, справедливый в случае, когда мощность P_{13} мала по сравнению с мощностью насыщения:

$$\Delta S_1 = (n_1^0 - n_3^0) T_1 T_2^2 \mu_{13}^2 H_{13}^2 / 4h^2. \quad (3)$$

Здесь n_1^0 и n_3^0 — бoльцмановские населенности уровней E_1 и E_3 , T_1 и T_2 — времена релаксации, μ_{13} и μ_{12} — матричные элементы дипольного момента, H_{13} — амплитуда магнитного поля в объеме образца V_0 . Используя формулу для добротности резонатора, можно выразить H_{13} через P_{13} :

$$H_{13}^2 = 4Q_{13}P_{13} (1 - \Gamma_{13}^2) \xi_{13}/v_{13} V_p. \quad (4)$$

В формулу (4) входят: Q_{13} — добротность резонатора, V_p — его объем, ξ — близкий к 1 коэффициент, определяемый геометрией резонатора, Γ_{13}^2 — коэффициент отражения резонатора по мощности. Поскольку $\xi_{13} \approx 1$ и $\Gamma_{13}^2 \ll 1$, соответствующими членами можно пренебречь, так что

$$\Delta\chi''_{12} = 2\mu_{13}^2 \mu_{12}^2 (n_1^0 - n_3^0) T_1 T_2^2 Q_{13} P_{13} / h^3 v_{13} V_p \quad (5)$$

и, следовательно,

$$(P_{13})_{\text{мин}} = \frac{h^3 v_{13} T_1^{-1} T_2^{-2}}{2\mu_{13}^2 \mu_{12}^2 (n_1^0 - n_3^0) Q_{13}} \frac{V_p}{V_0} (V_0 \Delta\chi''_{12})_{\text{мин}} \quad (6)$$

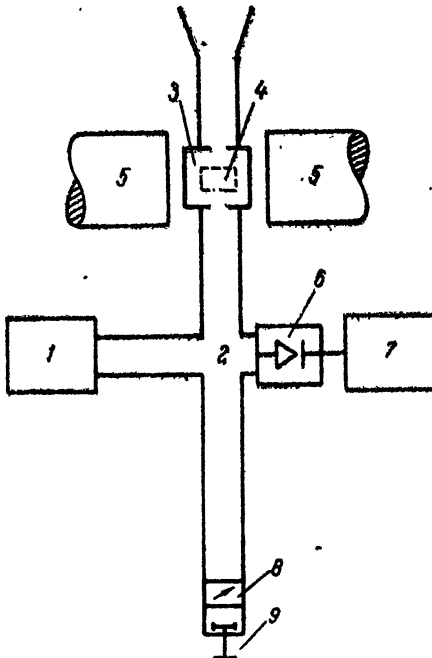


Рис. 1. Блок-схема радиоспектроскопа:

1—источник колебаний частоты ν_{12} , 2—волно-
водный мост, 3—резонатор, 4—парамагнетик,
5—магнит, 6—детектор, 7—приемник, 8—атте-
нуатор, 9—поршень.

Для измерения $\Delta\chi''_{12}$ может служить несколько видоизмененный радиоспектроскоп, блок-схема которого изображена на рис. 1. По имеющимся в литературе [3, 4]

данным, чувствительность спектроскопа может достигать $(V_0 \chi'')_{\text{мин}} = 10^{-13}$. Для численных оценок зададимся следующими значениями входящих в (6) параметров: $\mu_{12} = \mu_{13} = 10^{-20}$; $Q_{13} = 10^3$; $\nu_{13} = 10^{11}$ гц; $V_p/V_0 = 10$. В таблице 1 приведены вычисленные значения минимально обнаружимых значений P_{13} при температуре жидкого гелия и при комнатной температуре.

Таблица 1

T (°K)	T_1 (сек)	T_2 (сек)	$n_1^0 - n_3^0$ (см ⁻³)	P_{13} (вт)
300	10^{-8}	10^{-7}	10^{16}	10^{-6}
4	10^{-2}	10^{-7}	10^{18}	10^{-14}

Выше отмечалось, что формула (6) получена в предположении о малости вспомогательной мощности P_{12} по сравнению с насыщающей. Критерием является выполнение неравенства [5]

$$\frac{1}{4} \gamma^2 T_1 T_2 H_{12}^2 \ll 1,$$

г. е.

$$P_{12} \ll \frac{\nu_{12} V_p}{\gamma^2 T_1 T_2 Q_{12} (1 - \Gamma_{12}^2) \xi_{12}} \equiv P_{\text{кр}}, \quad (7)$$

где γ — гиромагнитное отношение для электрона. Вычисленные по этой формуле значения критических мощностей в зависимости от времен релаксации приведены в таблице 2 при $\nu_{12} = 10^{10}$ гц, $Q_{28} = 10^3$.

Таблица 2

$T_1 T_2$ (сек ²)	10^{-14}	10^{-12}	10^{-10}	10^{-8}
$P_{\text{кр}}$ (вт)	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}

При больших $T_1 T_2$ возможен другой режим работы, заключающийся в создании с помощью $P_{12} \gg P_{\text{кр}}$ полного насыщения уровней E_1 и E_2 . В этом случае при наличии $P_{13} > 0$ установится распределение $n_2 > n_1$ и может наблюдаться усиление колебаний ν_{12} . Однако известные в настоящее время парамагнетики не обладают достаточно большими временами релаксации и для реализации последнего случая потребуются существенно большие мощности P_{12} , чем в первом методе. Это обстоятельство снижает чувствительность и, следовательно, практическую ценность использования режима насыщения.

Проведенные выше оценки фактически определяют общую мощность P_{13} в полосе приема, которая при заданных $Q = 10^3$ и $T_2 = 10^{-7}$ сек будет порядка 1,5 мц².

Итак, наличие связи между P_{13} и χ''_{12} дает возможность использования парамагнитного спектроскопа, работающего на частоте ν_{12} , в качестве приемника колебаний более высокой частоты ν_{13} . При охлаждении рабочего вещества до температуры жидкого гелия может быть достигнута весьма высокая чувствительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. M. Clogston, J. Phys. Chem. Solids., 4, 271 (1958).
2. А. Н. Малахов, В. М. Файн, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 1, 5—6, 66 (1958).
3. D. J. E. Ingram, Spectroscopy at Radio at Microwave Frequencies, London, 1955.
4. G. Feher, Bell System Tech J., 36, 449 (1957).
5. N. Bloembergen, S. Wang, Phys. Rev., 93, 72 (1954).
6. A. Kastler, J. Opt. Soc. Amer., 47, 460 (1957).
7. M. Arditi, IRE National Convention Record, 1, 3 (1958).