

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ГАЗЕ

А. А. Белов, М. Д. Карасев, Н. В. Русанов

Электрический дипольный резонанс с избирательным поглощением и дисперсией на частотах, соответствующих разности штарковских подуровней, аналогичен широко используемому в радиоспектроскопии магнитному резонансу на частотах зеемановского расщепления. Однако нам неизвестны работы по прямой реализации электрического дипольного резонанса в газе из молекул с электрическим дипольным моментом. Такая реализация и является содержанием данного сообщения.

Газ, помещенный в скрещенные электрические поля: E_0 – постоянное и $E \cos \Omega t$ – переменное, претерпевает изменение его диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ при резонансе на частоте перехода, равной Ω . Расчет ожидаемого изменения диэлектрической проницаемости может быть выполнен обычными методами [1, 2] и для газа, состоящего из молекул типа симметричного волчка, приводит к выражению:

$$\Delta\epsilon_{max} = \frac{\pi \Omega T_2 N_0 \frac{d^2}{3kT} \frac{K^2(2J+1)}{J(J+1)} \frac{4(4I^2+4I)}{4I^2+4I+1} \sqrt{\frac{B^2 C h^3}{\pi (kT)^3}}}{\sqrt{1 + T_1 T_2 \Omega^2 \left(\frac{E}{2E_0}\right)^2}} \quad (1)$$

Здесь T_1 , T_2 – времена продольной и поперечной релаксаций, N_0 – концентрация молекул, d – дипольный момент молекул, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, J – вращательное квантовое число, K – квантовое число, определяющее проекцию момента количества движения на ось молекулы, (в (1) предполагается, что K не

кратно трем), I — спин ядер, не лежащих на оси молекулы (предполагается, что это три одинаковых ядра), B и C — вращательные константы молекулы, \hbar — постоянная Планка.

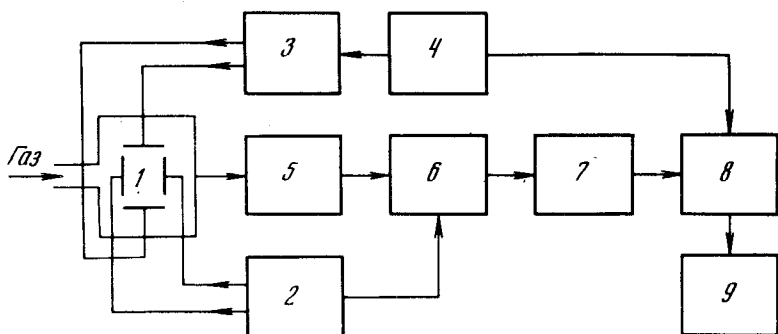


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки: 1 — газовая ячейка, 2 — генератор высокой частоты 25 Мгц, 3 — источник постоянного напряжения для создания поля, 4 — модулятор, 5 — усилитель высокой частоты, 6 — фазовый детектор, 7 — усилитель низкой частоты, 8 — синхронный детектор, 9 — самописец

Оценка величины $\Delta\epsilon$ по соотношению (1), например для молекул CH_3F , имеющих $d = 1,79$ ед. CGSE, при условии что $\Omega/2\pi = 25$ Мгц, $K = J = 1$, $T_1 = T_2 = 10^{-7}$ сек, давление газа равно 10^{-2} тор и насыщение отсутствует, дает при комнатной температуре $\Delta\epsilon_{\text{max}} \approx 6 \cdot 10^{-10}$. Если газ помещен в плоский конденсатор, то относительное изменение емкости последнего также должно иметь величину $\Delta\epsilon/c \approx 6 \cdot 10^{-10}$. Регистрация таких малых изменений емкости — задача не простая, но разрешимая. Имеющиеся в печати данные об экспериментах с емкостными датчиками малых перемещений [3] свидетельствуют о том, что в настоящее время разработаны методы, позволяющие измерять изменения емкости $\Delta\epsilon/c \approx 10^{-11}$. Следовательно, явление электрического дипольного резонанса может быть экспериментально зарегистрировано.

Для экспериментального обнаружения электрического резонанса была собрана установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1. Исследуемое газообразное вещество под давлением порядка $10^{-3} - 10^{-2}$ тор, заполняет газовую ячейку размером $30 \times 140 \times 360$ мм³, в которой с помощью двух конденсаторных систем созданы однородные и взаимно перпендикулярные постоянное и высокочастотное электрические поля. Напряженность постоянного поля E_0 можно изменять от нуля до 150 В/см. Высокочастотное поле имеет частоту 25 Мгц, его напряженность можно изменять от нуля до 10 В/см. Высокочастотный конденсатор включен в радиоэлектронную схему, позволяющую регистрировать небольшие изменения емкости. Постоянное электрическое поле в газовой ячейке модулируется по пилообразному закону с периодом порядка 5 мин и одновременно по гармоническому закону с частотой $\omega \approx 200$ гц. На выходе измерительной схемы с помощью синхронного детектора и самописца регистрируется амплитуда A_2 второй гармоники

гармонического модулирующего сигнала. Установка позволяет обнаруживать относительное изменение емкости $\Delta c / c \approx 10^{-10}$. Изменив фазу опорного напряжения фазового детектора, можно регистрировать и изменение поглощения.

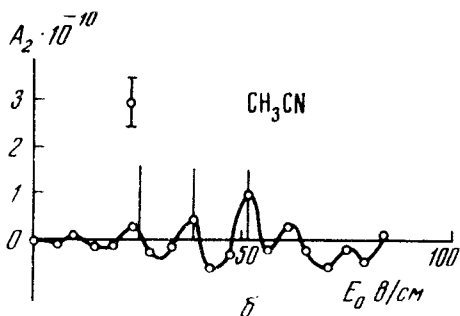
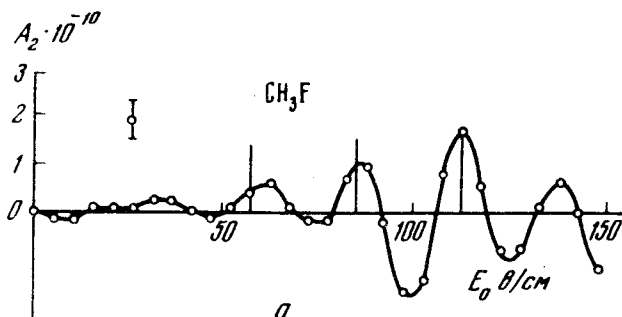


Рис. 2. Зависимость амплитуды второй гармоники емкости конденсатора газовой ячейки от напряженности поля E_0 : а — для CH_3F , б — для CH_3CN

Энергии штарковских подуровней определяются соотношением [1]

$$W_{JKM} = W_{JKM}^0 - E_0 d \frac{MK}{J(J+1)} \quad (2)$$

Здесь W_{JKM}^0 — энергия уровня (JKM) в отсутствие электрического поля, M — квантовое число, определяющее проекцию кинетического момента на направление поля E_0 . Принимая во внимание правило отбора $\Delta M = \pm 1$, для напряженности поля E_0 , соответствующей резонансу, с помощью (2) найдем

$$E_0 = \frac{\hbar J(J+1)\Omega}{dK} \quad (3)$$

Отсюда видно, что наименьшее значение E_0 получаем для $K = |J|$. В этом случае из (3) находим

$$E_0 = \frac{\hbar \Omega (J+1)}{d} \quad (4)$$

Следовательно, значения E_0 , соответствующие резонансу для $J = 1, 2, \dots$ образуют при $J = |K|$ эквидистантный ряд. Однако переходы с $|K| = J$ и $|K| \neq J$ накладываются таким образом, что только первые несколько резонансов для самых малых J могут быть обнаружены без искажений.

Эксперименты проводились с веществами CH_3F и CH_3CN . Молекула CH_3CN имеет дипольный момент $d = 3,92$ ед. CGSE. Ядро азота в этой молекуле имеет квадрупольный момент. Однако константа квадрупольного расщепления в данном случае невелика и квадрупольное расщепление оказывается много меньше штарковского для используемых в эксперименте частот.

На рис. 2 приведены кривые для двух разных газов: CH_3F и CH_3CN , полученные путем усреднения по трем записям самописца. На этом же рисунке вертикальными штрихами отмечены значения E_0 , которые должны соответствовать резонансам для $J = 1, 2$ и 3 по соотношению (4). Из рис. 2 видно, что действительно экспериментально наблюдается ряд резонансных пиков, положение которых соответствует соотношению (4). Рост амплитуды резонансных пиков с увеличением J находится в согласии с (1), если принять во внимание, что первые резонансы имеют место для $|K| = J$.

Отмеченное совпадение результатов расчета и эксперимента позволяет заключить, что явление электрического дипольного резонанса экспериментально обнаружено и может быть использовано в физических исследованиях.

В заключение выражаем благодарность члену-корреспонденту АН СССР, профессору В.В.Мигулину за полезные обсуждения постановки и результатов данной работы.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
29 мая 1978 г.

Литература

- [1] Ч.Таунс, А.Шавлов. Радиоспектроскопия, М., ИИЛ, 1959 г.
- [2] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика, М., изд. Наука, 1974.
- [3] В.Б.Брагинский, В.П.Митрофанов, В.Н.Руденко, А.А.Хорев. Приборы и техника эксперимента, №4, 241, 1971.