

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ГАЗОКИНЕТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Л.Л.Горелик

На примере  $N_2^{14}$  экспериментально обнаружены осцилляционные изменения интенсивности газокинетического магнитного резонанса (ГМР) в немагнитных газах при изменении постоянного магнитного поля. Относительное осцилляционное изменение ГМР теплопроводности оказалось  $\sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ , а период осцилляций  $\sim 10 \div 15$  Э. Представляется возможным связать обнаруженное явление с квантованием вращательных моментов и ядерно-вращательным взаимодействием.

Как известно, во взаимно перпендикулярных, постоянном и высокочастотном магнитных полях  $H_-$  и  $H_{\sim}$  возникает резонансное уменьшение теплопроводности газов  $\Delta K_r$ , достигающее максимальной величины при равенстве частоты прецессии магнитных моментов молекул в поле  $H_- = H_r$ , частоте  $f$  поля  $H_{\sim}$  (газокинетический магнитный резонанс – ГМР) <sup>1, 2</sup>. При проведении подобных исследований на  $N_2^{14}$  было обнаружено, что при заданных  $H_{\sim}$  и  $f$  монотонное изменение  $H_-$  приводит по мере приближения к  $H_- = H_r$  к небольшим осцилляционным изменениям теплопроводности  $\Delta K_{0s,r}$  на фоне изменения  $\Delta K_r(H_-)$ . Ниже приводятся некоторые (впервые упомянутые в <sup>3</sup>) результаты опытов, в которых обнаружена эта, ранее непредсказанная, осцилляционная структура (ОС) ГМР.

Экспериментальная установка и методика измерений подробно описаны в <sup>4, 5</sup>, некоторые особенности методики отражены в <sup>3</sup>. В ходе экспериментов снимались диаграммы разбаланса измерительного моста в зависимости от тока через электромагнит  $U(J)$ . Сигнал  $U(J)$  представляет собой сумму монотонного сигнала, обусловленного полностью скомпенсированным фоном, и сигнала  $U_{0s,r}(J)$ , вызванного ОС ГМР. Фон обусловлен эффектом Зенфлехена – Бинакера (ЭЗБ) и эффектом ГМР <sup>3</sup>. Сигнал  $U_{0s,r}(J)$  определял-

ся путем вычитания ординат кривой  $U(J)$  из ординат огибающей ее кривой, не имеющей минимумов. С точностью  $\sim 10\%$  значению  $J = 1$  А соответствует  $H_{\sim} = 430$  Э. Все опыты проводились при комнатной температуре, большинство из них — при давлении  $p \sim 30$  мторр,  $J \sim 1,5 \div 2$  А,  $H_{\sim} \sim 120$  Э,  $f \sim 150 \div 185$  кГц.

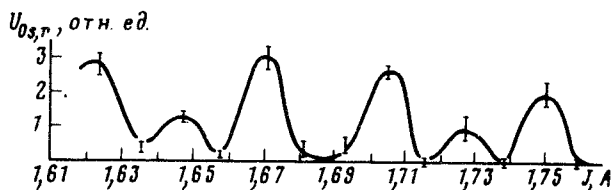


Рис. 1

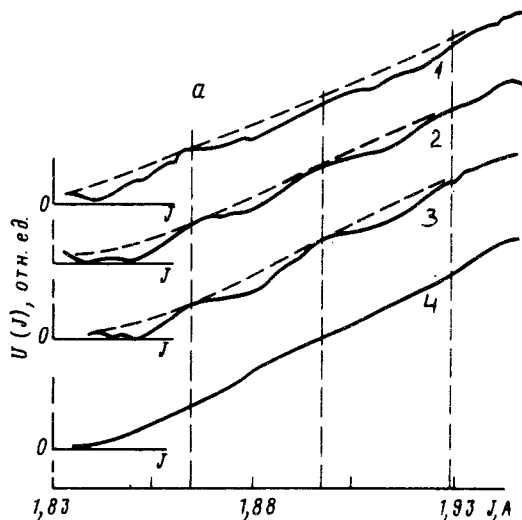


Рис. 2

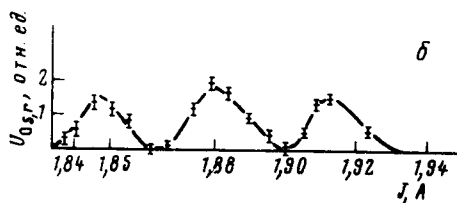


Рис. 3

На рис. 1 изображен ход относительного осцилляционного изменения  $U_{0s,r}(J)$  при давлении  $p \sim 30$  мторр и  $f = 156$  кГц в диапазоне изменения  $J$ , которому соответствует изменение  $H_{\sim}/H_p$  в пределах  $0,94 \div 1,03$ . Видно, что период осцилляций  $\Delta H_{0s}$  составляет  $\sim 10 \div 15$  Э. По приблизительным оценкам амплитудное значение отношения  $\Delta K_{0s,r}/K$  составляет  $\sim 10^{-6} \div 10^{-5}$  (т. е. порядка долей процента от  $\Delta K_r/K$ ). Интересно отметить, что осцилляции были наблюдаемы и при повышении давления вплоть до  $\sim 0,6$  торр, когда значение  $H/P \sim 1$  кЭ/торр, т. е. при условии, весьма отличающемся от рассмотренного теорией <sup>2</sup> предельного условия возникновения ГМР. На рис. 2, а (кривые 1–3) представлены три диаграммы  $U_r(J)$ , полученные в одном из таких опытов на фоне остаточного, неполностью скомпенсированного эффекта Зенфлгебена – Бинакера при  $J \sim 1,6 \div 1,95$  А и  $f = 183$  кГц. Сравнение их с диаграммой 2, а кривая 4 (где  $H_{\sim} = 0$ ) показывает, что при указанных условиях ГМР состоит из отдельных, полностью разрешенных пиков. Результаты статистической обработки нескольких подобных диаграмм представлены на рис. 2, б в виде кривой  $U_{0s,r}(J)$ ;  $\Delta H_{0s}$  и  $\Delta K_{0s,r}/K$  составили  $\sim 10 \div 15$  Э и  $\sim 10^{-6}$ , соответственно.

ОС ГМР качественно отличается по характеру проявления от осцилляционной структуры, возникающей в постоянном магнитном поле (при  $H_{\sim} = 0$ ) — “осцилляционного” эффекта ОЭ, описанного на примере  $N_2$  в <sup>3</sup> 1). Период и интенсивность осцилляций

<sup>1</sup>) ОЭ наблюдается также на  $N_2$ ,  $CO$ ,  $D_2$ . Показано, что, в отличие от высказанного в <sup>6</sup> предположения, этот эффект не связан с примесями кислорода.

ГМР на  $N_2$  приблизительно на порядок больше, чем у ОЭ на том же газе. Наблюденная ОС не находит объяснения в рамках известной теории ГМР<sup>2</sup>. Естественно предположить, что ОС ГМР связана с влиянием на ход ГМР не учитываемых этой теорией внутренних молекулярных полей. В самом деле, в результате взаимодействия внутреннего поля с вращательным моментом молекулы  $M$ , частота прецессии последнего  $\omega$  изменится на  $\Delta\omega \sim E/M$ , где  $E$  — переданная ему энергия. В молекуле  $N_2^{14}$  вращательный момент взаимодействует с ядерными квадрупольными моментами через посредство обусловленного электронной оболочкой градиента электрического поля<sup>7</sup>. В этом случае могут возникнуть осцилляции, связанные с квантованием  $E$  и  $M$ . В пользу такой интерпретации, в частности, говорят известные данные о резонансных спектрах, полученных методом молекулярных пучков<sup>7-9</sup>. Поскольку исходной предпосылкой теории в этом случае, как и в ГМР, является резонансный характер прецессионного движения вращательных моментов в скрещенных полях<sup>8</sup>, то представляется вполне правдоподобной определенная аналогия в интерпретации полученных этими методами осцилляций (несмотря на то, что они соответствуют разным физическим проявлениям прецессии).

Исследования ОС ГМР могут дать новые возможности изучения структуры молекул. Так например, в отличие от метода ОС ГМР, чувствительность метода молекулярных пучков оказалась недостаточной для обнаружения резонансного спектра в  $N_2^{14}$ <sup>7</sup>. Учитывая, что ГМР, как оказалось, может быть наблюден при относительно малых значениях отношений  $H_{\perp}/P$  и  $H_{\parallel}/P$ , возникает возможность существенного упрощения экспериментальной методики ГМР. Представляется, что в перспективе метод ОС ГМР, после его определенного совершенствования и создания соответствующей теории, сможет оказаться полезным для многих исследований.

В последнее время на описанной установке В.С.Лазько была наблюдена хорошо выраженная ОС ГМР на  $O_2$ , связанная с квантованием вращательного момента и его взаимодействием с нескомпенсированным электронным спином электронной оболочки (определяющим парамагнетизм этого газа)<sup>10</sup>. Однако, применения полученных при этом на  $O_2$  результатов для развития новых методов научных исследований ограничиваются, в основном, только парамагнитными газами, а также тем, что в этом случае метод ГМР по чувствительности резко уступает методу электронного парамагнитного резонанса<sup>2)</sup>.

В заключение автор выражает благодарность А.А.Сазыкину, И.С.Гладких и Л.А.Максимову за полезное обсуждение результатов, В.С.Лазько за помощь в работе, Ю.Н.Лебедеву за помощь в наладке усилительной аппаратуры.

#### Литература

1. Борман В.Д., Горелик Л.Л., Николаев Б.И., Синицын В.В. Письма в ЖЭТФ, 1967, 6, 945.
2. Борман В.Д., Максимов Л.А., Михайлова Ю.В., Николаев Б.И. ЖЭТФ, 1967, 53, 2143.
3. Горелик Л.Л. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 403.
4. Борман В.Д., Горелик Л.Л., Лазько В.С. Николаев Б.И., Хмелев А.В. Препринт ИАЭ, 1976, №2623, Москва.
5. Горелик Л.Л., Лазько В.С. ЖЭТФ, 1983, 84, 931.
6. Аверкиев Н.С., Дьяконов М.И. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 196.
7. Chan S.J., Bakér M.R., Ramsey N.F. Phys. Rev., 1964, 136 A, 1224.

2) Поскольку все газокинетические эффекты в полях имеют "вращательное" происхождение, то из соображений конкретного отображения вида структуры и единства терминологии целесообразно вместо употребляемого в<sup>10</sup> термина "вращательный" спектр ГМР применять, как и в случае непарамагнитных газов, ставший уже традиционным, предложенный для описания подобных явлений И.К.Кикоиним, термин "осцилляционная" структура (или спектр). При этом, в частности, отражается отличие ОС ГМР от других немонотонных особенностей структуры ГМР (например, от центрального минимума ГМР и гармоник ГМР).

8. *Gederberg J.W., Ramsey N.F.* Phys. Rev., 1964, 135A, 39.
9. *Gederberg J.W., Anderson C.H., Ramsey N.F.* Phys. Rev., 1964, 136 A, 960.
10. *Лазько В.С., Рябов В.А.* Письма в ЖЭТФ, 1985, 41, 137.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
18 марта 1985 г.

После переработки  
18 июля 1985 г.

---