

ОПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНОГО РЕЗОНАНСА НА УДАЛЕННЫХ ЯДРАХ В $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ (0,02%)

С. А. Казанский

Методом оптического детектирования на линиях поглощения B_1 и B_2 ионов Cr^{3+} в Al_2O_3 изучен ДЭЯР на удаленных ядрах Al^{27} при накачке различных переходов между зеемановскими подуровнями основного состояния ансамбля ионов Cr^{3+} , связанных между собой слабым обменным взаимодействием $J \sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$.

При исследовании механизмов динамической поляризации ядер (ДПЯ) кристалла, возникающей при накачке системы примесных электронных спинов в магнитном поле под действием высокочастотного СВЧ поля [1], необходимо осуществлять контроль за состоянием спиновой системы, например, измеряя коэффициент поглощения СВЧ поля. Однако прямое измерение поглощения накачки при мощностях, значительно превышающих порог насыщения, когда ДПЯ особенно эффективна, методами традиционного ЭПР затруднено. В настоящем сообщении изучены особенности метода оптического детектирования (ОД) поглощения мощной СВЧ накачки при одновременном воздействии радиочастотного (РЧ) поля, насыщающего ядерную зеемановскую подсистему решетки – ОД эффекта ДЭЯР (двойного электронно-ядерного резонанса) на удаленных ядрах в $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ [2].

При $T = 1,8\text{K}$ на линиях поглощения B_1 ($\lambda = 4762\text{\AA}$) и B_2 ($\lambda = 4745\text{\AA}$) ионов Cr^{3+} в Al_2O_3 изучалась зависимость магнитного циркулярного дихроизма (МЦД) от величины постоянного магнитного поля H_0 ($0 \div 7 \text{ кГс}$)

при одновременном воздействии СВЧ – поля H_1 и РЧ – поля $H_2 \sim 0,2$ Гс в диапазоне $(0,2 + 5$ МГц). Образец $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ ($\sim 0,02\%$) размером $4 \times 4 \times 4$ мм³ помещался внутрь СВЧ резонатора типа TE_{011} , $Q \sim 2000$, X-диапазона ($\nu_e = 8,90$ ГГц) с отверстиями для прохождения пучка зондирующего света ($\Delta\lambda \sim 1\text{Å}$) вдоль оси кристалла с $\parallel H_0$. Неточность ориентации оси с: $\angle c, H_0 < 2^\circ$. Поля H_0, H_1 и H_2 были взаимно ортогональны. Величина МЦД $\Delta\kappa(H_0)$ в отсутствие СВЧ поля определяется бoльцмановским заселением зеемановских подуровней основного состояния 4A_2 ($S = 3/2$) иона Cr^{3+} и степенью циркулярной поляризации оптических переходов с подуровней основного в возбужденные состояния,

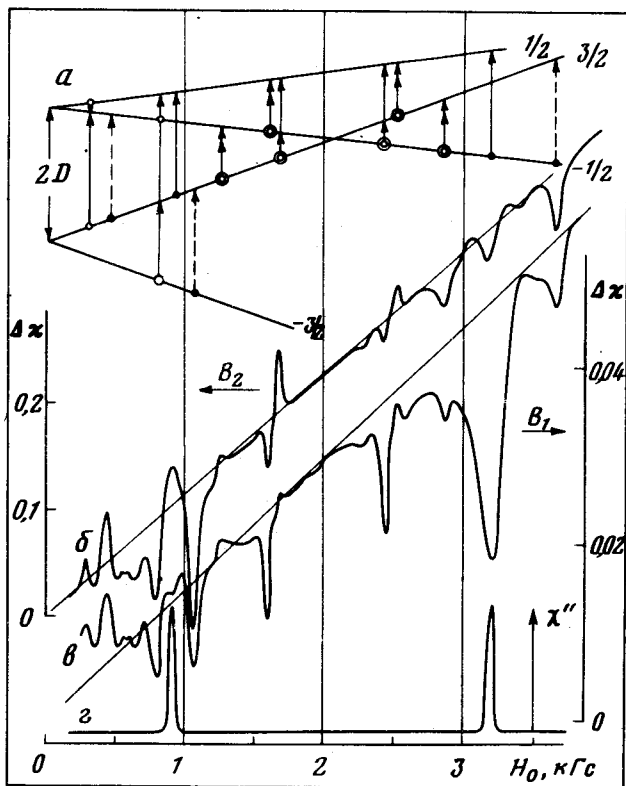


Рис. 1

различной для линий B_1 и B_2 [3]. Воздействие СВЧ мощности $P_e \leq 100$ мВт искажает монотонную зависимость $\Delta\kappa(H_0) \sim H_0$ (рис. 1, б, в), причем наблюдаемые в этом случае экстремумы соответствуют резонансным значениям поля H_0 , при котором осуществляются переходы между зеемановскими подуровнями основного состояния иона Cr^{3+} (спектр ОД ЭПР). Для сравнения на рис. 1, в представлен спектр ЭПР поглощения χ'' при $P_e \sim 1$ мкВт. На рис. 1, а приведена идентификация спектра ОД ЭПР. Помимо линий разрешенных переходов, наблюдаемых в спектрах ЭПР, в спектре ОД ЭПР присутствуют также запрещенные переходы $\Delta M = \pm 2$ и 3. Отличительной особенностью ОД ЭПР является присутствие "комбинационных" переходов, с точностью $\sim 0,001$ см⁻¹, в пределах погрешности эксперимента, удовлетворяющих соотношению $h\nu_e = |h\nu_i \pm h\nu_j|$, где $h\nu_i$ и $h\nu_j$ – энергетическое расстояние между

любими двумя подуровнями изолированного иона Cr^{3+} в магнитном поле, в частности $h\nu_e = 2h\nu_i$ ¹⁾. Необходимо отметить, что интенсивность спектра ОД ЭПР определяется абсолютным количеством СВЧ квантов, поглощенных при резонансе. Поэтому, использование СВЧ мощности $P_e \approx 100$ мВт, на ~ 50 дБ превышающей порог насыщения для разрешенных переходов $-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$, позволило отчетливо зарегистрировать в

спектре ОД ЭПР запрещенные (превышение порога насыщения на $20 \div 30$ дБ) и комбинационные (превышение порога на ~ 10 дБ) переходы. Интенсивность запрещенных переходов $\Delta M = \pm 2$ может быть объяснена неточностью ориентации оси с кристалла в магнитном поле.

Анализ экспериментальных данных по положению линий и вероятности комбинационных переходов (10 дБ/50 дБ), $\sim 10^{-4}$ от вероятности разрешенных переходов приводит к выводу о том, что за появление комбинационного спектра ответственно обменное взаимодействие [4] $J \sim 10^{-3}$ см⁻¹ между ионами Cr^{3+} . Кроме того, в кристалле $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}(0,02\%)$, по-видимому, отсутствуют ионы $\text{Cr}^{3+}(n_c)$ с большими величинами J , с которых была бы возможна эффективная передача СВЧ возбуждения к "изолированным" ионам Cr^{3+} (в концентрации n_o): $n_c < \tau_2/\tau_1 n_o \sim 10^{-4} n_o$,

где τ_1 и τ_2 — время спин-решеточной (SL) и спин-спиновой (SS) релаксации ионов ($\text{Cr}^{3+}(n_o)$). Так как оцениваемое значение $J \sim \Delta\nu_o$ — где $\Delta\nu_o$ — ширина неоднородно уширенной линии ЭПР иона Cr^{3+} в Al_2O_3 [2], можно предположить, что в спектре ОД ЭПР наблюдаются парные возбуждения всего ансамбля ионов¹⁾ Cr^{3+} (в отличие от спектров ЭПР удаленных пар $\text{Cr}^{3+} - \text{Cr}^{3+}$ с $J > 0,3$ см⁻¹, изученных в [5]).

Интересно отметить, что форма линии, соответствующей переходу $-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$, в спектре ОД ЭПР не изменяется (с точностью \sim неск.%)

при изменении $P_e = 0,1 \div 100$ мВт. Этот результат свидетельствует об установлении квазиравновесия в резервуаре SS-взаимодействий ионов Cr^{3+} с единой температурой T_{SS} , отличной от температуры решетки T_o и зеемановской подсистемы ионов Cr^{3+} : T_z в условиях накачки перехода $-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$. Оценки времени (τ'_1) SL-релаксации SS-резервуара дают [1]: $\tau'_1 \sim (12/130)^2 (\tau_1 \sim 0,4 \text{ сек}) \sim 0,34 \cdot 10^{-2}$ сек.

При воздействии насыщающего РЧ поля на частотах, резонансных переходам между зеемановскими подуровнями ядер Al^{27} решетки Al_2O_3 наблюдается изменение контура линий спектра ОД ЭПР. Это изменение контура δ ($\Delta\kappa$), рис. 2,б обычно составляет $\sim 10\%$ от интенсивности соответствующих линий ОД ЭПР при $P_e \approx 100$ мВт (рис. 2,а) и имеет характерную зависимость от H_o , свидетельствующую о механизме ДПЯ в условиях нерезонансной накачки [1, 2]. На рис. 2,г — е представлен спектр

¹⁾ При $H_o = 5,73$ кГс в спектре ОД ЭПР наблюдается также переход $h\nu_e = 2h\nu_{1/2 \rightarrow 3/2}$ (на рис. 1 не представлен).

²⁾ Ширина спинового пакета $\sim 0,4$ мГц в неоднородной линии ЭПР [2] $\Delta\nu_o \approx 40$ мГц обязана, очевидно, флуктуациям обменного взаимодействия.

изменения величины МЦД в области различных линий спектра ОД ЭПР ($P_e \approx 100$ мВт) в зависимости от частоты РЧ-поля (спектр ОД ДЭЯР).

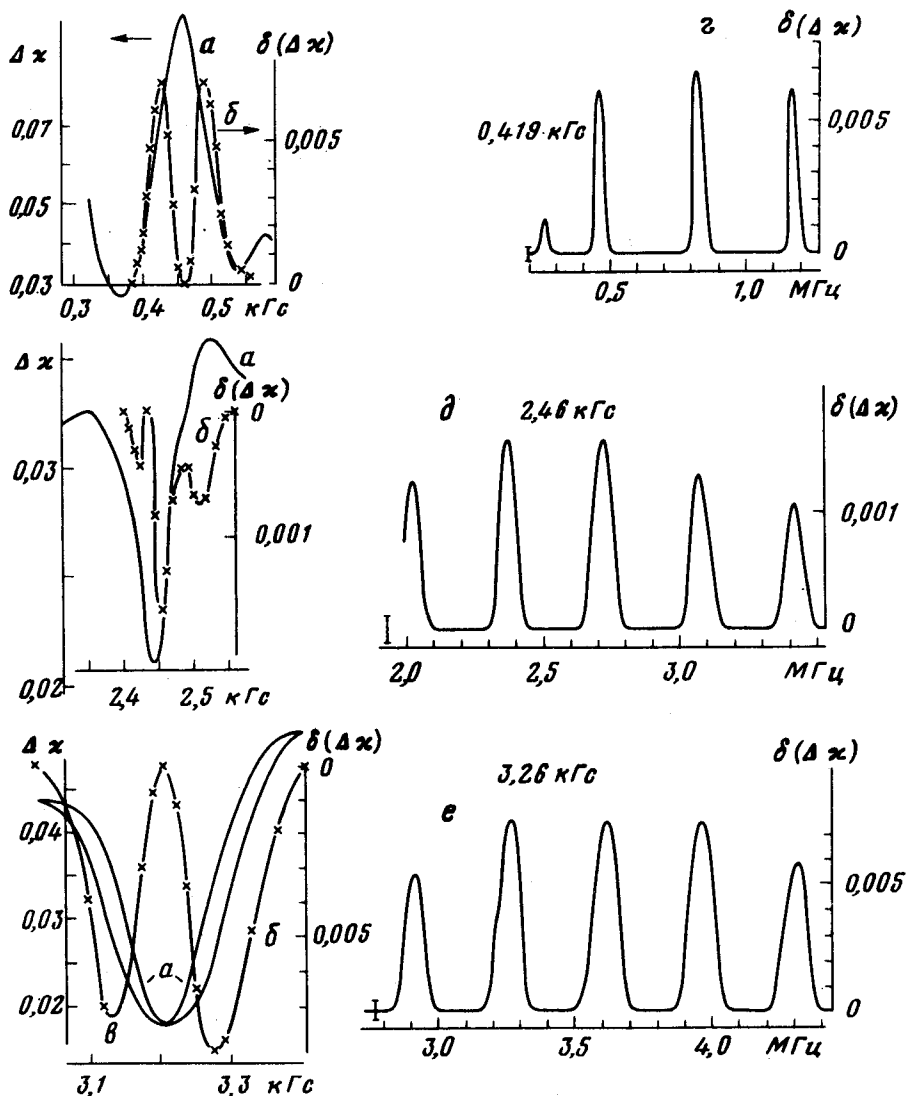


Рис. 2

Интересно отметить, что увеличение мощности нерезонансной СВЧ накачки $P_e = 0,1 \rightarrow 100$ мВт на крыле линии $-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$ при одновременном воздействии РЧ поля, насыщающего ядерную зеемановскую подсистему Al^{27} приводит к монотонному уширению линии в спектре ОД ЭПР (на рис. 2, в, $P_e \approx 100$ мВт) и, соответственно, росту эффекта ОД ДЭЯР от ~ 10 до $\sim 27\%$ от интенсивности линии $-\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$ в спектре ОД ЭПР.

Автор благодарит чл.-корр. АН СССР П.П.Феофилова за внимание к работе, а также Г.И.Романову и Г.Л.Антокольского за консультации при постановке эксперимента.

Государственный
оптический институт
им. С.И.Вавилова

Поступила в редакцию
24 июля 1979 г.

Литература

- [1] В.А.Ацаркин. УФН, 126, 3, 1978; В.А.Ацаркин, М.И.Родак. УФН, 107, 3, 1972.
 - [2] J.Lambe, N.Laurance, E.C.McIrvine, R.W.Terhune. Phys. Rev., 122, 1161, 1961.
 - [3] S.Sugano, I.Tsujikawa. J. Phys. Soc. Japan, 13, 899, 1958.
 - [4] A.Abragam, B.Bleaney. Electron Paramagnetic Resonance of Transition Ions, Clarendon Press, Oxford, 1970; перев.: А.Абрагам, Б.Блини, Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, М., изд. Мир, 1972.
 - [5] H.Statz, L.Rimai, M.J.Weber, G.A.de Mars, G.F.Koster. J. Appl. Phys., Suppl. to 32, 218, 1961.
-