

## ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ДВУХФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ДВУХУРОВНЕВОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЕ

Федорук Г.Г.

Institute of Physics, University of Szczecin, 70-451, Szczecin, Poland

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, 220064, Минск, Беларусь

e-mail: [fedaruk@wmf.univ.szczecin.pl](mailto:fedaruk@wmf.univ.szczecin.pl)

Многофотонные процессы, в которых одновременно поглощается или испускается несколько фотонов, играют важную роль в нелинейной оптике. Хотя подобные процессы давно известны также в магнитном резонансе, лишь в последнее время появился интерес к изучению их динамики, в частности, в двухуровневых спиновых системах [1–4]. В таких системах роль промежуточных энергетических уровней могут играть «одетые» электромагнитным полем спиновые состояния [3]. В недавних исследованиях динамики многофотонных процессов в двухуровневых спиновых системах использовалось бихроматическое излучение, созданное поперечным СВЧ и продольным радиочастотным (РЧ) полями [1,3,4]. Большая разница в частотах возбуждающих полей открыла новые возможности двухчастотной магниторезонансной спектроскопии и ее аппаратной реализации. В такого рода импульсных ЭПР экспериментах, базирующихся на одновременном поглощении или испускании нескольких фотонов с заметно различающимися частотами, удалось зарегистрировать двух- и трехфотонное электронное спиновое эхо, когда сумма энергий одного СВЧ и одного или двух РЧ фотонов равнялась резонансной частоте двухуровневой спиновой системы [1]. Затем наблюдалась двухфотонная нестационарная нутация [5] и индуцированная РЧ полем прозрачность среды по отношению к СВЧ излучению [6]. Аналогичная конфигурация полей дала возможность исследовать также в ЭПР однофотонную нутацию, обусловленную переходами между состояниями двухуровневой системы, «одетой» резонансным СВЧ полем [3,4]. Кроме того, в ЯМР исследована трехфотонная нутация между «одетыми» состояниями двухуровневой системы [2]. Как известно, нутация непосредственно отражает динамику квантовых переходов во время взаимодействия излучений со спиновой системой, а ее частота дает прямую информацию об амплитуде эффективного поля этого взаимодействия. В настоящей работе измерено эффективного поля в случае бихроматического возбуждения нутации на одетых состояниях и двухфотонной нутации.

Эксперименты выполнены при комнатной температуре на модельной двухуровневой спиновой системе –  $E_1'$ -центрах в кристаллическом кварце. Статическое магнитное поле было параллельным оптической оси кристалла. В этом случае спектр ЭПР состоит из одиночной линии с шириной  $\Delta B_{pp} = 0.016$  мТл. Обычная нестационарная нутация возбуждалась в результате скачкообразного установления резонансного взаимодействия непрерывного СВЧ излучения со спиновой системой с помощью импульса магнитного поля [4]. При этом длительность отрицательных импульсов магнитного поля составляла 10 мкс, их амплитуда  $\Delta B = 0,12$  мТл, а период повторения импульсов – 1,25 мс. На рис. 1 (а) приведен типичный сигнал обычной нутации с частотой  $\omega_1 / 2\pi = 0,98$  МГц. Частота данной нутации при резонансном ( $\omega = \omega_0$ ) возбуждении описывается соотношением  $\omega_1 = \gamma B_1$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение электрона,  $B_1$  – амплитуда циркулярно поляризованной компоненты СВЧ поля  $2B_1 \cos(\omega t)$ ,  $\omega_0 = \gamma B_0$  – резонансная частота спиновой системы. Оцененное из затухания нутации время спин-спиновой релаксации  $T_2 = 3.5 \pm 0.4$  мкс обусловлено диполь-дипольным взаимодействием  $E_1'$ -центров [4].

Непрерывное линейно поляризованное радиочастотное поле  $2B_2 \cos(\omega_{rf}t)$ , приложенное вдоль статического магнитного поля, использовалось для возбуждения переходов между спиновыми состояниями, одетыми СВЧ полем [3,4]. Когда  $\omega_{rf}$  близка к  $\omega_1$ , наблюдается нутация на одетых спиновых состояниях в виде модуляции обычной нутации частотой  $\omega_2 = \gamma B_2$ . Пример такой нутации приведен на рис. 1 (b) при  $\omega_{rf} \approx \omega_1/2\pi = 0,97$  МГц и  $B_2 = 8,2$  мкТл. Пунктирная линия получена из формулы

$$v \propto [1 + \cos(\omega_2 t)] \sin(\omega_1 t) \exp\left(-\frac{t}{T_{mp}}\right) \quad (1)$$

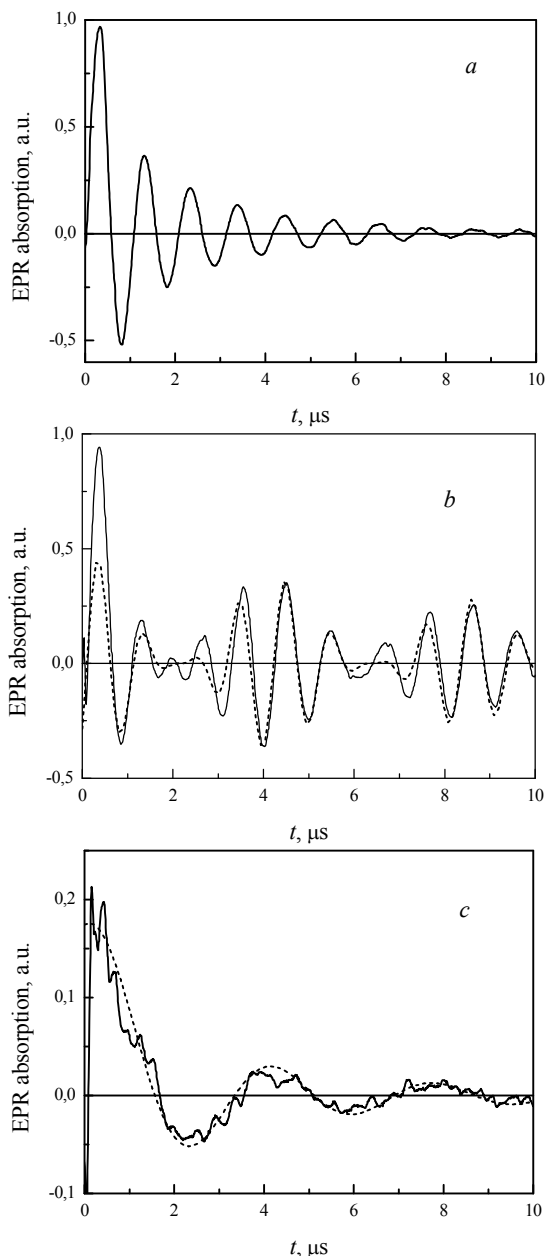


Рис. 1. Обычная нутация (a), нутация на одетых состояниях (b) и двухфотонная нутация (c)  $E_1'$ -центров в кварце.

при  $\omega_2 = 2\pi \times 0,23$  МГц и  $T_{mp} = 15$  мкс. Как видно, время затухания нутации «одетых» состояний заметно больше времени затухания обычной и коррелирует с временем спин-решеточной релаксации во вращающейся системе координат [4].

Для улучшения отношения сигнал/шум использовалось многоканальное цифровое суммирование сигналов. Привязка фазы РЧ поля к фазе МВ поля отсутствовала. Отсутствовала также привязка фазы РЧ поля к началу импульса магнитного поля.

Непрерывное РЧ поле и импульс магнитного поля создавались пропусканием тока через один и тот же модуляционный элемент. В данном случае измерение токов, создающих эти поля, позволило найти амплитуду  $B_2$  создаваемого в месте расположения образца РЧ поля при известной амплитуде импульса магнитного поля  $\Delta B$ . Величина  $\Delta B$  определялась по частоте биений (равных  $\Delta B/\gamma$ ) в сигнале свободной индукции. Это позволяло определять амплитуду  $B_2$  РЧ поля с точностью около 5%. Возможность калибровки  $B_2$  в нашем эксперименте позволило исследовать зависимость  $\omega_2$  от  $B_2$  количественно. Как видно из рис. 2, полученные данные соответствуют теоретически ожидаемой зависимости для частоты нутации «одетых» спиновых состояний  $\omega_2 = \gamma B_2$ , представленной линией.

Двухфотонная нутация возбуждалась когда сумма энергий СВЧ и РЧ фотонов равнялась разности энергий спиновых состояний ( $\omega_{mw} + \omega_{rf} = \omega_0$ ). Данная нутация, зарегистрированная при  $\omega_1/2\pi = 0,96$  МГц,  $\omega_2/2\pi = 1,02$  МГц и отстройке  $\delta = \omega_0 - \omega$  от однофотонного резонанса, равной  $\delta \approx \omega_{rf} = 2,62$  МГц, представлена на рис. 1 (c).

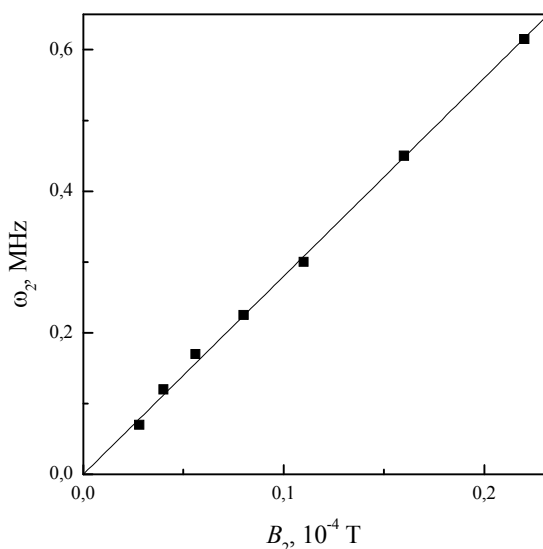


Рис. 2. Зависимость частоты нутации «одетых» спиновых состояний при их резонансном ( $\omega_{rf} = \omega_1$ ) возбуждении от амплитуды РЧ поля  $B_2$ .

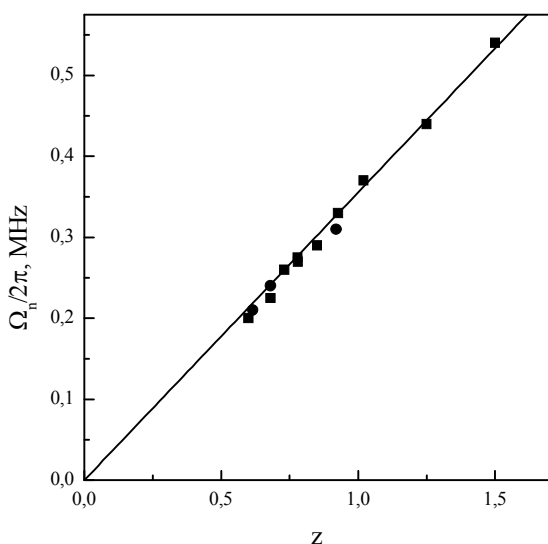


Рис. 3. Зависимость частоты двухфотонной нутации от параметра  $z = 2\omega_2/\omega_{rf}$ .

Двухфотонный характер нутации подтвержден измерением ее частоты в зависимости от амплитуды и частоты радиочастотного поля, а также от амплитуды СВЧ поля. Установлено, что частота этой нутации  $\Omega_n \propto \omega_1\omega_2/\omega_{rf}$  в соответствии с предсказаниями теории [6]. Наблюдавшиеся сигналы двухфотонной нутации достаточно хорошо аппроксимируются характерной для неоднородной линии зависимостью, которая в данном случае может быть записана в виде:

$$v \propto J_0(\omega_{1,1}t) \exp\left(-\frac{t}{2T_2}\right). \quad (2)$$

Пунктирной линией на рис. 1 (с) изображена зависимость, даваемая формулой (2) при  $\omega_{1,1}/2\pi = 0,28$  МГц и  $T_2 = 3,5$  мкс. При этом в результате неоднородного уширения частота двухфотонной нутаций практически не зависела от отстройки от резонанса, а определялась амплитудой  $\omega_{1,1}$  эффективного поля. Скорость затухания двухфотонной нутации близка к скорости затухания однофотонной нутации и обусловлена спин-спиновым взаимодействием  $E_1'$ -центров.

Возможность измерения в данном эксперименте амплитуд СВЧ и РЧ полей позволила (с точностью не хуже 10 % даже в случае самых низких частот нутации) определить эффективное поле двухфотонных переходов. Оно оказалось равным  $\omega_{1,1} = k \omega_1\omega_2/\omega_{rf}$ , где значение  $k$  близко к величине  $k = 1/\sqrt{2}$ . Это может быть связано с тем, что, как отмечено в [7], эффект продольного поля на переходы с участием «одетых» состояний в подобного типа экспериментах может быть в  $\sqrt{2}$  раз меньше, чем эффект поперечного поля.

1. I. Gromov, A. Schweiger. J. Magn. Res. **146**,

110 (2000).

2. H. Hatanaka, M. Sugiyama and N. Tabuchi. J. Magn. Res. **165**, 293 (2003).

3. G. Jeschke. Chem. Phys. Lett. **301**, 5–6, 524 (1999).

4. Г.Г. Федорук ФТТ **46**, 9, 1631 (2004).

5. Г.Г. Федорук. ЖЭТФ. **100**, 6, 1216 (2005).

6. M. Kälin, I. Gromov, A. Schweiger. Phys. Rev. A **69**, 033809 (2004)

7. S.A. Holmstrom, A.S.M. Windsor, C. Wei, J.P.D. Martin, N.B. Manson. J. Luminescence **76–77**, 38 (1998).