

УДК 535.2

## ОБЯЗАННАЯ СВЕРХТОНКОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ МОДУЛЯЦИЯ ФОРМЫ СИГНАЛОВ ПЕРВИЧНОГО И СТИМУЛИРОВАННОГО ФОТОННОГО ЭХА В РУБИНЕ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*В.В. Самарцев, А.М. Шегеда, А.В. Шкаликов,  
В.А. Зуйков, И.З. Латыпов, Т.Г. Митрофанова*

### Аннотация

Экспериментально обнаружена модуляция временной формы сигналов первичного (ПФЭ) и стимулированного (СФЭ) фотонного эха в естественном и обогащенном рубине с периодом модуляции около 20 нс, которая объяснена за счет сверхтонкого взаимодействия валентных электронов изотопа  $^{53}\text{Cr}$  со своим собственным ядром (спин которого  $3/2$ ). Поставлены оптические эхо-эксперименты на образце рубина, обогащенном только ионами изотопа  $^{53}\text{Cr}$ , в постоянном продольном магнитном поле 200 Гс. Исследованы кривые спада сигналов ПФЭ и СФЭ и оценено время фазовой релаксации, обязанное спектральной диффузии. Снят спектр сигнала СФЭ в обогащенном рубине в магнитном поле.

**Ключевые слова:** фотонное эхо, модуляция формы, рубин, магнитное поле, сверхтонкое взаимодействие, фазовая релаксация.

### Введение

В работах [1, 2] была обнаружена модуляция временной формы сигнала ПФЭ в естественном рубине, которая была приписана сверхтонкому взаимодействию (СТВ) валентных электронов ионов изотопа  $^{53}\text{Cr}$  со своим собственным ядром. Несмотря на то что процентное содержание этого изотопа в естественном рубине невелико (всего 9.6%), детектирование этой модуляции стало возможным благодаря высокой чувствительности аппаратуры и применению широкополосного стробоскопического осциллографа. Результаты этих исследований воспроизведены на рис. 1 [1, 2].

Детальный анализ модуляции формы ПФЭ в естественном рубине показал, что: а) она не может быть объяснена за счет существования изотопических сдвигов, поскольку их величины составляют десятки ГГц; б) она не может быть объяснена за счет суперсверхтонкого взаимодействия (ССТВ) из-за того, что его частоты составляют примерно единицы МГц [3], то есть на порядок меньше, чем в экспериментах [1, 2]; в) она может быть объяснена за счет сверхтонкого взаимодействия валентных электронов ионов изотопа  $^{53}\text{Cr}$  со своим собственным ядром, поскольку значения сверхтонких расщеплений достигают нескольких десятков МГц, а им соответствуют периоды модуляций порядка 20–40 нс, находящиеся в согласии со значениями периодов биений на рис. 1. Этот изотоп является единственным, у которого ядерный спин не равен нулю ( $I = 3/2$ ), причем константа  $A$  сверхтонкого взаимодействия  $AS_I$  (где  $S$  и  $I$  – электронный и ядерный спины) равна 51 МГц. Как известно [4], модуляция за счет сверхтонкого взаимодействия может быть лишь за счет его анизотропной части, которая делает сверхтонкий спектр неэквилидистантным и

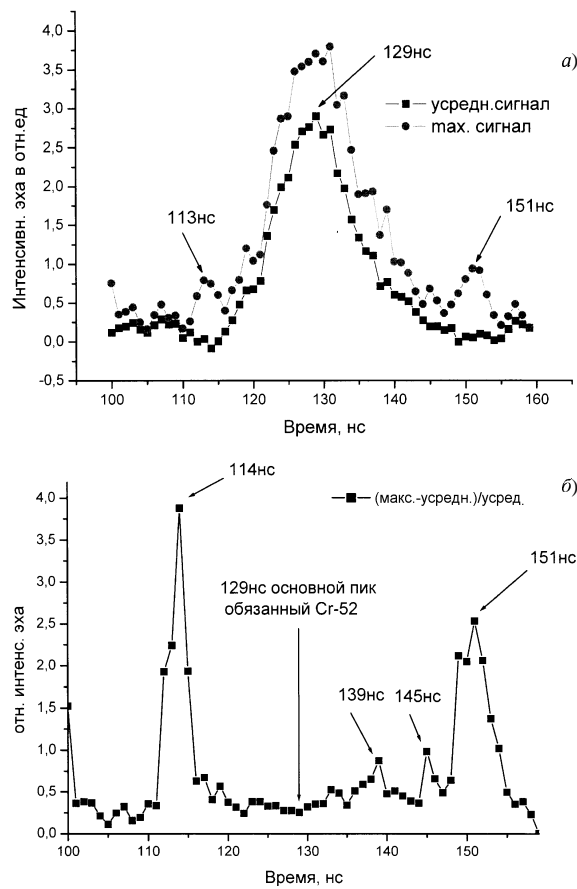


Рис. 1. Временная форма сигнала ПФЭ в естественном рубине (с концентрацией  $\text{Cr}^{3+}$ , равной 0.1 ат.%) в условиях двухимпульсного широкополосного возбуждения в режиме обращения (а) и результаты статистического анализа биений формы, в которых отброшен вклад в форму ПФЭ четных изотопов хрома (б). Расстояние между крайними выбросами (151 и 114 нс) равно 37 нс, то есть частота модуляции равна примерно 30 МГц. «Внутренние» выбросы (145 и 139 нс) малы и при анализе будут отброшены

определяется в выражении для энергетического сверхтонкого расщепления [5] членом, пропорциональным  $A^2$ . Результаты экспериментов [1, 2] стимулировали авторов данной работы к постановке дополнительного эхо-эксперимента на образце, обогащенном только ионами изотопа  $^{53}\text{Cr}$ , в постоянном магнитном поле. Описанию результатов этого эхо-эксперимента посвящена представленная работа. Такие исследования, как показал анализ литературы, проведены впервые.

### 1. Экспериментальные результаты исследования временной формы сигналов ПФЭ и СФЭ и их кривых спада в обогащенном (изотопом $^{53}\text{Cr}$ ) рубине в слабом постоянном магнитном поле

Экспериментальная установка, на которой проводились новые эхо-эксперименты, описана в работе [2]. Исследования выполнялись на длине волны 6934 Å, соответствующей энергетическому переходу  $^4A_2 \rightarrow ^2E(\bar{E})$ , с использованием 10-наносекундных импульсов излучения лазера на красителе (oxazin1) с шириной

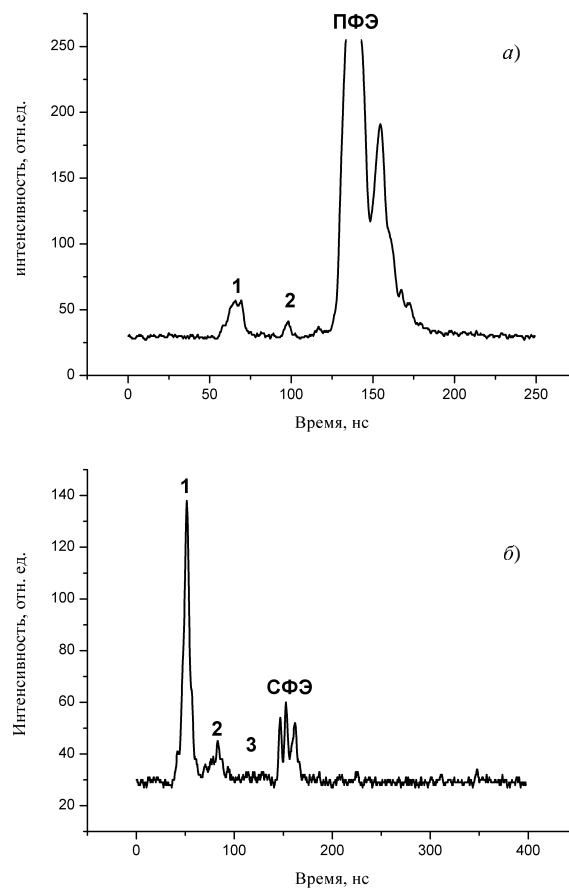


Рис. 2. Осциллограммы сигналов, наблюдаемых в экспериментах по ПФЭ (а) и СФЭ (б) в обогащенном рубине в слабом продольном магнитном поле; 1, 2, 3 – ослабленные возбуждающие импульсы

спектра  $0.1 \text{ \AA}$ . Был реализован режим обращения, детально описанный в монографии [3], при котором сигналы ПФЭ и СФЭ излучаются резонансной средой в направлении, обратном направлению первого импульса. Образец обогащенного рубина с концентрацией ионов  $^{53}\text{Cr}^{3+}$ , равной  $0.03\text{--}0.05 \text{ ат.}\%$ , имел линейные размеры  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  при толщине  $2 \text{ мм}$ . Эхо-эксперименты проводились в постоянном магнитном поле  $200 \text{ Гс}$ , направление которого было близко или совпадало с направлением оптической оси кристалла. Осциллограммы сигналов ПФЭ (а) и СФЭ (б) в обогащенном рубине в магнитном поле приведены на рис. 2.

Из снятых осциллограмм на рис. 2 видно, что временная форма эхо-сигналов, особенно сигнала СФЭ, испытывает биения с периодом  $20\text{--}30 \text{ нс}$ , что согласуется со сверхтонким расщеплением ионов изотопа  $^{53}\text{Cr}$ , равным нескольким десяткам мегагерц. В принципе, это находится в соответствии с выводами, сделанными в работах [1, 2].

Был снят спектр сигнала СФЭ в исследуемом образце, который, как видно из рис. 3, коррелирует со спектром поглощения этого же образца.

Поскольку локальное магнитное поле  $H_l$  составляет  $12 \text{ Гс}$ , то помещение образца обогащенного рубина в магнитное поле  $H_0 > H_l$  приводит к подавлению спек-

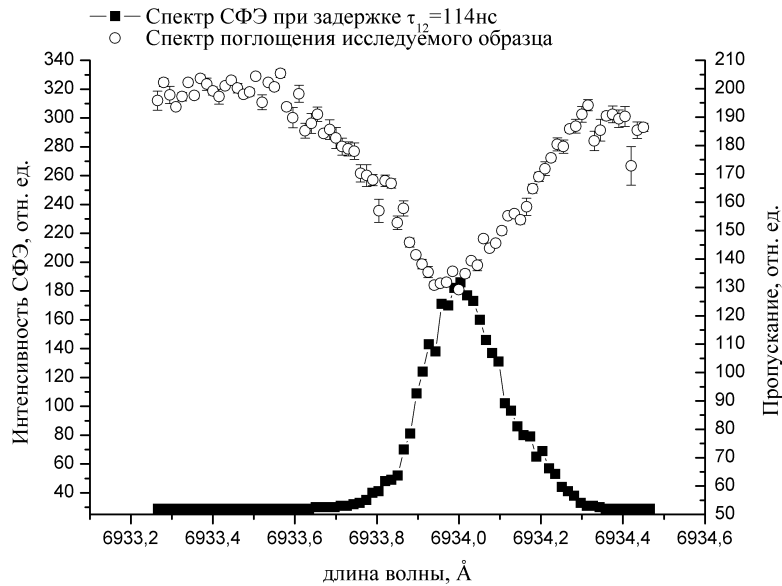


Рис. 3. ■ – спектр сигнала СФЭ в обогащенном рубине в слабом постоянном магнитном поле  $H_0 = 200$  Гс. ○ – спектр поглощения рубина

тральной диффузии с характеристическим временем спада, равным 23 нс. В итоге эхо-сигналы в постоянном магнитном поле оказываются более интенсивными. Этот рост интенсивности оказался столь значительным, что нам удалось снять кривые спада сигналов ПФЭ и СФЭ в этом образце обогащенного рубина. Они приведены на рис. 4.

Наблюдающиеся биения этих кривых с периодом около 130 нс, скорее всего, связаны с суперсверхтонким взаимодействием валентных электронов ионов хрома с ядрами алюминия, поскольку оценка параметра этого взаимодействия дает единицы МГц. Анализ кривой спада интенсивности ПФЭ от  $\tau_{12}$  показал, что значение времени фазовой релаксации равно  $T_2 = 98$  нс.

### Заключение

Таким образом, в данной экспериментальной работе впервые наблюдаются сигналы ПФЭ и СФЭ в кристалле рубина, обогащенном только ионами изотопа  $^{53}\text{Cr}^{3+}$  в слабом продольном магнитном поле. Эти эхо-эксперименты показали, что временная форма эхо-сигналов особенно СФЭ, испытывает модуляцию, обусловленную СТВ валентных электронов ионов изотопа  $^{53}\text{Cr}^{3+}$  со своими ядрами, в то время как модуляция кривых спада сигналов ПФЭ и СФЭ по-прежнему обязана ССТВ этих электронов с ядрами алюминия.

Исследования поддержаны Программой Президиума РАН «Квантовая макрофизика», Программами ОФН РАН «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты» и «Когерентные акустические поля и сигналы», РФФИ (проекты № 08-02-00032а, 08-02-90001-Бел а), а также гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-2965.2008.2).

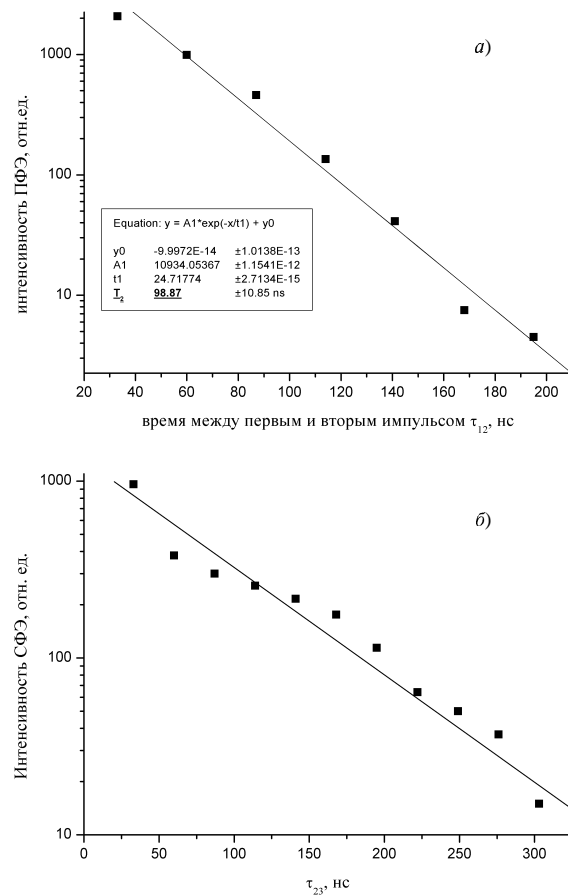


Рис. 4. Кривые спада сигналов ПФЭ (а) и СФЭ (б) в обогащенном рубине в постоянном магнитном поле. Кривая спада (б) снята при фиксированном значении интервала между первыми двумя импульсами ( $\tau_{12} = 33$  нс). Интервал  $\tau_{23}$  обозначает запаздывание третьего импульса относительно второго

### Summary

*V.V. Samartsev, A.M. Shegeda, A.V. Shkalikov, V.A. Zwikov, I.Z. Latypov, T.G. Mitrofanova.* Hyperfine Modulation of the Shape of the Primary and Stimulated Photon Echoes' Signals in Ruby in the Permanent Magnetic Field.

The modulation of the temporal shape of the primary (PPE) and stimulated (SPE) photon echoes is for the first time observed in natural and enriched ruby in slow magnetic field. The modulation period is equal to 20 ns. This modulation can be explained by means of the hyperfine interaction of valent electrons of  $^{53}\text{Cr}$ -isotope with its own nuclei (the spin of which is equal to  $3/2$ ). The new echo-experiment is carried out on the sample of ruby enriched by isotope  $^{53}\text{Cr}^{3+}$ , in permanent magnetic field (200 G). The temporal decay of PPE and SPE are researched, and the time of phase relaxation (which is obliged of spectral diffusion) is estimated. The spectrum of SPE-signal in the ruby in magnetic field is investigated.

**Key words:** photon echo, shape modulation, ruby, magnetic field, hyperfine interaction, phase relaxation.

## Литература

1. *Samartsev V.V., Shegeda A.M., Shkalikov A.V., Zuikov V.A.* Detection of satellites of primary photon echo in ruby // *Laser Physics*. – 2003. – V. 12. – P. 1487–1490.
2. *Самарцев В.В., Зуйков В.А., Шегеда А.М., Шкаликков А.В.* Световое (фотонное) эхо в рубине // *Нелинейные динамические процессы* / Под ред. С.В. Пранца. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – С. 130–140.
3. *Манькин Э.А., Самарцев В.В.* Оптическая эхо-спектроскопия. М.: Наука, 1984. – 270 с.
4. *Салихов К.М. Семенов А.Г. Цветков Ю.Д.* Электронное спиновое эхо и его применение. – Новосибирск: Наука, 1976. – 342 с.
5. *Карлов Н.В. Маненков А.А.* Квантовые усилители. Серия: Итоги науки. – М.: ВИНТИ, 1966. – 334 с.

Поступила в редакцию  
26.02.08

---

**Самарцев Виталий Владимирович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [samartsev@kfti.knc.ru](mailto:samartsev@kfti.knc.ru)

**Шегеда Анатолий Михайлович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоакустики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [shегда@kfti.knc.ru](mailto:shегда@kfti.knc.ru)

**Шкаликков Андрей Викторович** – младший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [Shkalikov@mail.knc.ru](mailto:Shkalikov@mail.knc.ru)

**Зуйков Владимир Александрович** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [zuikov@mail.knc.ru](mailto:zuikov@mail.knc.ru)

**Латыпов Ильнур Зиннурович** – магистрант кафедры оптики и нанофотоники физического факультета Казанского государственного университета.

E-mail: [bibidey@mail.ru](mailto:bibidey@mail.ru)

**Митрофанова Татьяна Геннадьевна** – научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: [mitrofanova@kfti.knc.ru](mailto:mitrofanova@kfti.knc.ru)