

## МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА МАГНИТНЫМ РЕЗОНАНСОМ В ПАРАМАГНЕТИКЕ

А.В.Буташин<sup>1)</sup>, С.О.Демокритов, Н.М.Крейнес, В.И.Кудинов

Обнаружена модуляция света парамагнитным резонансом ( $\nu_{\text{ЭПР}} = 36$  Гц) в парамагнитном кубическом кристалле  $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (NdGG).

Модуляция света магнитным резонансом в магнитоупорядоченных кристаллах к настоящему моменту наблюдалась в нескольких веществах: в ферромагнетиках  $\text{CrBr}_3$ <sup>1</sup> и  $\text{K}_2\text{CuF}_4$ <sup>2</sup>, в антиферромагнетике  $\text{CoCO}_3$ <sup>3</sup>, в ферримагнетиках ЖИГ'e<sup>4</sup> и  $\text{RbNiF}_3$ <sup>5</sup>. Возможность наблюдать это явление в такого сорта веществах связана, во-первых, с наличием большого спонтанного момента (ферро- или антиферромагнитного) и, во-вторых, с наличием больших величин магнитооптических эффектов (эффекта Фарадея или (и) анизотропного магнитного двупреломления. Подробнее см.<sup>6</sup>). Подобное явление наблюдалось также в полупроводнике *n*-типа  $\text{CdS}$ <sup>7</sup> при возбуждении магнитного резонанса на примеси.

Представлялось интересным обнаружить модуляцию света ЭПР в обычном парамагнетике<sup>2)</sup>. Теоретическая задача рассматривалась в<sup>8</sup>.

1) Сотрудник физического факультета МГУ.

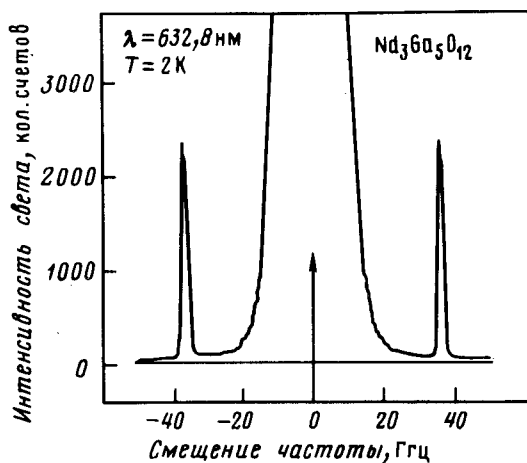
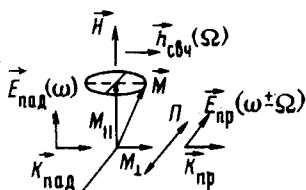
2) В процессе выполнения этой работы нам стало известно (частное сообщение), что подобные эксперименты проводятся в Казанском государственном университете Б.И.Кочелаевым, Ю.Г.Назаровым, А.Х.Хасановым на парамагнитном церий-магниево-нитрате.

В качестве объекта исследования нами был выбран кубический неодим-галлиевый гранат  $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (NdGG), который вплоть до  $T_N = 0,516$  К остается парамагнетиком, а ниже этой температуры упорядочивается антиферромагнитно<sup>9</sup>. Проведенные в<sup>10</sup> измерения намагниченности этого кристалла при  $T = 4,2$ К показали, что в полях  $\sim 50$  кЭ магнитный момент достигает довольно большой величины —  $4\pi M \approx 960$  Гс.

В наших измерениях мы использовали образцы, выращенные методом Чохральского в Проблемной лаборатории магнетизма физического факультета МГУ.

Предварительные исследования показали наличие большого фарадеевского вращения в NdGG при  $T \leq 2$ К. Нами была определена константа Верде  $B$  при этой температуре,  $B = 278$  град/см·кЭ. Бал обнаружен также ЭПР на частоте  $\nu = 36$  Гц ( $T \leq 2$ К). Наблюдаемая резонансная линия поглощения состояла из нескольких слабозрешенных спутников и имела большую ширину. Величина поглощения составляла 10 — 15% от подаваемой мощности при объеме кристалла  $2 \cdot 10^{-2}$  см<sup>3</sup>.

Для обнаружения модуляции света в NdGG мы воспользовались установкой для изучения мандельштам-бриллюэновского рассеяния света, подробно описанной в<sup>3, 6</sup>. Исследовался спектральный состав света, прошедшего через кристалл при возбуждении в нем ЭПР (рассеяние под углом  $\theta \approx 0^\circ$ ). В качестве спектрального прибора использовался высококонтрастный трехпроходный сканируемый интерферометр Фабри — Перо (ИФП) американской фирмы "Burleigh". Источником света служил гелий-неоновый лазер ЛГ-38 ( $\lambda = 0,628$  нм, мощность  $\sim 20$  мВт). Исследуемый образец помещался в оптическом гелиевом криостате внутри закороченного волновода в пучность магнитной компоненты СВЧ поля  $h$ . Резонанс возбуждался на частоте  $\nu = 36$  Гц. Падающий свет распространялся вдоль оси [111] кристалла, перпендикулярно постоянному магнитному полю  $H$ . Его поляризация  $E$  была параллельна  $H$ , и  $H \perp h$  (см. рисунок). Для измерений использовалась температура  $T \lesssim 2$ К.



Спектр света, прошедшего через образец  $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ , при возбуждении в последнем парамагнитного резонанса на частоте  $\nu_{\text{свч}} = 36$  Гц,  $\lambda_{\text{света}} = 632,8$  нм,  $T = 2$ К. В верхней части рисунка показана геометрия эксперимента

Эксперимент проводился следующим образом. В образце возбуждался ЭПР, и фиксировалось некоторое значение магнитного поля в пределах линии поглощения. При этих условиях производилась максимально-возможная компенсация света, проходящего через оптическую систему. После этого накапливался и регистрировался спектр прошедшего света. Пример записи такого спектра приведен на рисунке. Видно, что зарегистрированный спектр поми-

мо несмещенной линии содержит два спутника существенно меньшей интенсивности, смещенные на частоту ( $\pm \nu_{\text{ЭПР}}$ ) резонанса. Их интенсивность составляет  $10^{-5}\%$  от интенсивности падающего на кристалл света. Появление спутников при возбуждении ЭПР свидетельствует о наличии модуляции света парамагнитным резонансом. Соответственно глубина модуляции равна  $\sim 10^{-7}$ . Модуляция света наблюдалась нами в пределах всей линии СВЧ поглощения. Интенсивность спутников была пропорциональна величине СВЧ поглощения при постоянной подаваемой мощности. Как видно из рисунка интенсивности стоксового и антистоксового спутников в спектре рассеяния одинаковы.

Для объяснения наблюдаемого явления, можно применить квазиклассическую картину резонанса (см. рисунок). Полная намагниченность кристалла  $M$  прецессирует в фазе с СВЧ полем. При этом осциллирующая в направлении распространения света поперечная компонента намагниченности —  $M_{\perp} (M_{\perp} \perp H)$  за счет эффекта Фарадея меняет интенсивность прошедшего через систему света с частотой  $2\nu_{\text{ЭПР}}$ . Анализ прошедшего света с помощью ИФП приводит к появлению в спектре двух спутников с частотами  $\pm \nu_{\text{ЭПР}}$ . Для аналитического описания этого явления применима формула, выведенная Диллоном для ферромагнитного  $\text{CrBr}_3$  (формула (3) в <sup>1</sup>). Из нее следует, что интенсивность спутников пропорциональна квадрату величины фарадеевского вращения, а следовательно  $M_{\perp}^2$ . В более общем случае она может зависеть от других магнитооптических эффектов (см. <sup>6</sup>). Однако в нашем случае равенство интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент в спектре говорит, что остальные магнитооптические эффекты малы (на  $\lambda = 632,8$  нм). Это подтверждается и независимыми экспериментами. Глубина модуляции (или интенсивность спутников) позволяет определить угол отклонения спинов от положения равновесия в резонансе. Отсюда, зная величину подаваемой СВЧ мощности, можно определить время поперечной релаксации системы. Нами были проведены подобные оценки и получено значение  $10^{-11}$  с. Таким образом оптические эксперименты позволяют получить независимые данные по релаксации системы.

Авторы выражают благодарность П.Л.Капице за предоставленную возможность выполнить работу в ИФП, А.С.Боровику-Романову и Р.З.Левитину — за плодотворные обсуждения, Е.К.Ждановой — за полировку образцов.

#### Литература

1. Hanlon J.T., Dillon J.E., Jr. J. Appl. Phys., 1965, 36, 1269.
2. Borovik-Romanov A.S., Kreines N.M., Laiho R., Lévola T., Zhotikov V.G. J. Phys. "C", 1980, 13, 879.
3. Боровик-Романов А.С., Жотиков В.Г., Крейнс Н.М., Панков А.А. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 705.
4. Веницкий В.Н., Еременко В.В., Матюшкин Э.В. ЖЭТФ, 1977, 72, 1517.
5. Боровик-Романов А.С., Демокритов С.О., Крейнс Н.М., Петров С.В. Тезисы Докладов XXII Всесоюзного совещания по физике низких температур, г. Кишинева, 1982, ч. 1, с. 119.
6. Borovik-Romanov A.S., Kreines N.M. Phys. Rep., 1982, 81, 351.
7. Romestain R., Geschwind S., Devlin G.E., Wolff P.A. Phys. Rev. Lett., 1974, 33, 10.
8. Bloembergen N., Pershan P.S., Wilcox L.R. Phys. Rev., 1960, 120, 2014.
9. Onn D.G., Meyer H., Remetka J.P. Phys. Rev., 1967, 156, 663.
10. Nekvasil V., Roskovec V., Zounova F., Novotny P. Czech. J. Phys., 1974, B24, 810.