

Сдвиг линии магнитного резонанса в двухслойных композиционных феррит-пьезоэлектрических структурах на основе железо-иттриевого граната – цирконата-титаната свинца

Антоненков О.В. (fdma@novsu.ac.ru), Бичурин М.И., Филиппов Д.А.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Введение

В связи с широким развитием современной техники и все возрастающими требованиями к ней встает вопрос о возможности получения и использования материалов с широким диапазоном физических свойств. Появляется возможность создания и исследования материалов, в которых можно комбинировать традиционные свойства: магнитные и сегнетоэлектрические, магнитные и полупроводниковые и т. д. К таким материалам в частности относятся МЭ материалы, т.е. материалы, в которых возможно возникновение намагниченности под действием электрического поля и поляризации под действием магнитного поля. МЭ материалы особенно интересны в СВЧ диапазоне, где появляется возможность наблюдения ряда новых эффектов, обусловленных МЭ взаимодействием.

В области магнитного резонанса наблюдается резонансный МЭ эффект, который представляет сдвиг резонансной линии под действием внешнего электрического поля. Его возникновение в композитах связано с механическим взаимодействием ферритовой и пьезоэлектрической подсистем. При приложении электрического поля вследствие пьезоэффекта в пьезоэлектрической фазе возникают механические напряжения, которые передаются в магнитную компоненту и за счет магнитострикции происходит изменение магнитного момента, в результате чего наблюдается сдвиг резонансной линии. В [1] представлена теория МЭ эффекта в композиционных феррит - пьезоэлектрических материалах для слоистых образцов. В этой работе рассматривается структура, состоящая из механически зажатых магнитострикционно – пьезоэлектрических дисков без учета сил трения между слоями. Однако на практике гораздо чаще используются образцы в свободном состоянии, где силы трения учитываются. В данной работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование сдвига линии магнитного резонанса в двухслойных феррит-пьезоэлектрических структурах.

Модель и основные уравнения

В качестве модели рассмотрен свободный двухслойный феррит - пьезоэлектрический образец в форме диска радиуса R , состоящий из феррита с кубической ($m3m$) симметрией толщиной ${}^m h$ и пьезоэлектрика с ∞m симметрией относительно оси поляризации толщиной ${}^p h$. Толщина диска мала по сравнению с его радиусом, т.е. ${}^m h, {}^p h \ll R$. На нижней и верхней поверхности образца нанесены тонкие металлические контакты, толщиной которых можно пренебречь (рис. 1). Слой пьезоэлектрика поляризован по нормали к плоскостям контактов (ось Z). Ограничимся случаем, когда ось поляризации пьезоэлектрической фазы совпадает с $[111]$ осью магнестрикционной фазы. Постоянное (подмагничивающее) и переменное магнитные поля совпадают с направлением поляризации.

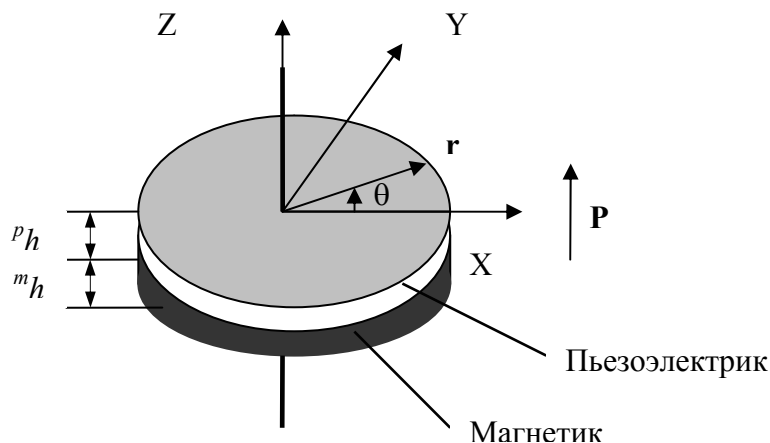


Рисунок 1 - Геометрия образца

Так как поверхности диска свободные, то, следовательно, нормальные составляющие тензора механических напряжений на них равны нулю. Для тонкого диска можно считать, что компонента тензора напряжений T_3 равна нулю не только на поверхности, но и во всем объеме. Верхняя и нижняя поверхности диска представляют собой эквипотенциальные поверхности, поэтому отличной от нуля будет только z -проекция вектора напряженности электрического поля. С учетом этого уравнения для тензора деформаций магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно имеют вид:

$${}^m S_1 = s_{11} {}^m T_1 + s_{12} {}^m T_2,$$

$${}^m S_2 = s_{12} {}^m T_1 + s_{22} {}^m T_2,$$

$${}^p S_1 = s_{11} {}^p T_1 + s_{12} {}^p T_2 + d_{31} E_3, \tag{1}$$

$${}^p S_2 = s_{12} {}^p T_1 + s_{22} {}^p T_2 + d_{31} E_3,$$

где ${}^m s_{ij}$, ${}^p s_{ij}$ – модули податливости магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно, d_{ij} – пьезоэлектрические модули, E_3 – z-проекция вектора напряженности электрического поля.

Для дальнейших расчетов удобно воспользоваться симметрией задачи и перейти к цилиндрической системе координат. На границе раздела феррит-пьезоэлектрик имеем следующие граничные условия: ${}^m S_{rr} = k {}^p S_{rr}$, где $k = 0 \div 1$ – коэффициент, учитывающий неидеальность контакта между фазами. Кроме того, при $r = 0$ смещение ${}^m u(r) = {}^p u(r) = 0$. Из условия равновесия образца следует, что при $r = R$ ${}^m T_{rr} {}^m h + {}^p T_{rr} {}^p h = 0$. Выражая компоненты тензора напряжений через компоненты тензора деформаций и решая уравнение эластостатики с учетом граничных условий, для компонент тензора напряжений были получены следующие выражения [2]:

$${}^m T_{rr} = \frac{k}{{}^m s_{11} (1 - {}^m \nu) + k \eta {}^p s_{11} (1 - {}^p \nu)} d_{31} E_3,$$

$${}^m T_{\theta\theta} = \frac{k}{{}^m s_{11} (1 - {}^m \nu) + k \eta {}^p s_{11} (1 - {}^p \nu)} d_{31} E_3, \tag{2}$$

где ${}^m \nu = - {}^m s_{12} / {}^m s_{11}$, ${}^p \nu = - {}^p s_{12} / {}^p s_{11}$ – коэффициенты Пуассона магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно, $\eta = {}^m h / {}^p h$ – отношение толщины ферромагнетика к толщине пьезоэлектрика.

Механические напряжения приводят к изменению намагниченности феррита, вследствие чего происходит сдвиг линии магнитного резонанса. В [2] было показано, что сдвиг линии магнитного резонанса при приложении электрического поля E_3 для случая, когда магнитное поле H лежит в (111) плоскости образца и параллельно направлению [011], равен:

$$\delta H_E = \frac{({}^m T_{rr} + {}^m T_{\theta\theta}) \lambda_{100}}{4M_0} = \frac{1}{2M_0} \frac{k \lambda_{100}}{{}^m s_{11} (1 - {}^m \nu) + k \eta {}^p s_{11} (1 - {}^p \nu)} d_{31} E_3, \tag{3}$$

где M_0 – намагниченность насыщения, λ_{100} – константа магнитострикции.

Таким образом, как следует из выражения (3) величина сдвига линии магнитного резонанса зависит от параметров магнитной и пьезоэлектрической фаз, их процентного состава. Из (3) видно, что сдвиг резонансной линии линеен по электрическому полю и увеличивается при увеличении процентного содержания пьезоэлектрика в составе структуры

(при уменьшении параметра $\eta = m\hbar / p\hbar$). Полученное выражение справедливо и для многослойных структур.

В качестве проверки полученных результатов были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования

В эксперименте использовался резонансный метод исследования МЭ эффекта [3]. Измерения проводились на частоте 9.3 ГГц на установке, включающей спектрометр ЭПА-2М с двойной магнитной модуляцией. К образцу при помощи токопроводящего клея присоединялись электроды. Образец исследуемого материала устанавливался в держатель. Держатель с образцом на несколько секунд опускался в расплавленный пинеин (смесь воска и канифоли). Таким способом устраняется возможность пробоя через воздух. Закрепленный на поворотном столике держатель с образцом опускался в центр магнитного резонатора в пучность переменного магнитного поля, и прикладывалось постоянное магнитное поле. При напряженности поля электромагнита в образце происходит резонансное поглощение энергии сверхвысокой частоты, что вызывает изменение уровня энергии, падающей на детектор (сигнал ферромагнитного резонанса). Для повышения чувствительности применена высокочастотная модуляция магнитного поля, осуществляемая с помощью витка индуктивности введённого в резонатор и питаемого от специального генератора. На электроды подавалось импульсное напряжение величиной до 5 кВ в форме прямоугольных импульсов с регулируемой частотой и скважностью для уменьшения влияния нагрева образца на результаты измерений. Сигнал высокой частоты, выделяемый в момент резонанса, усиливался и подавался на синхронный детектор, на выходе которого получалась первая производная линии поглощения. Воздействие на образец МЭ материала электрического поля приводит к смещению линии спектра магнитного резонанса. В качестве сдвига резонансного магнитного поля принималось смещение нуля производной сигнала. Первая производная линии поглощения наблюдалась на экране осциллографа.

Исследования эффекта проводились на образцах из композиционного феррит - пьезоэлектрического материала на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) и цирконата-титаната свинца (ЦТС). Использовались образцы в виде дисков диаметром 5 мм и толщиной 0.25÷0.80 мм. На частоте 9.3 ГГц измерялась величина постоянного магнитного поля, при котором наблюдался ферромагнитный резонанс, определялась ширина резонансной линии. Затем к образцам прикладывалось электрическое поле в форме “меандра” и исследовалось изменение положения линии магнитного резонанса и ее ширины.

На рисунках 2, 3 приведены результаты измерения и экстраполированные кривые

сдвига линии магнитного резонанса для двухслойной структуры, состоящей из ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 750 мкм.

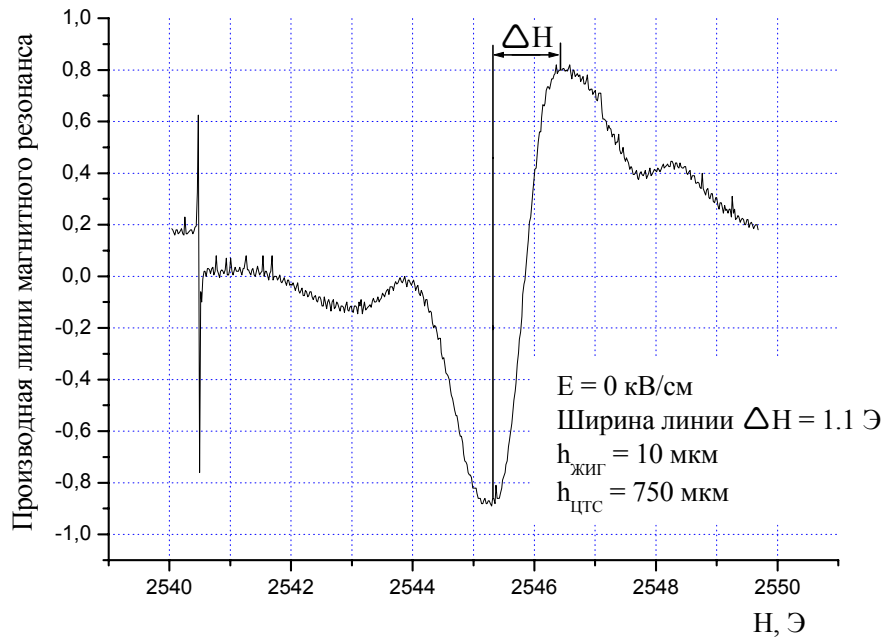
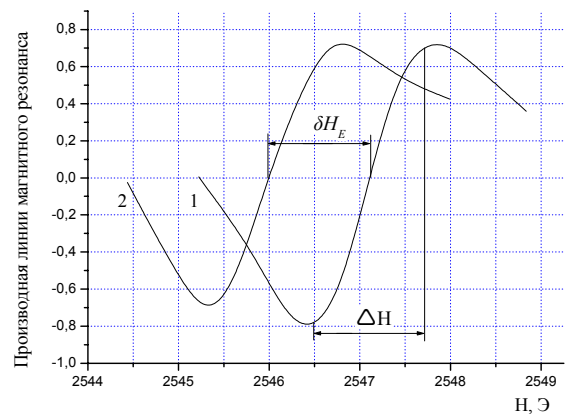
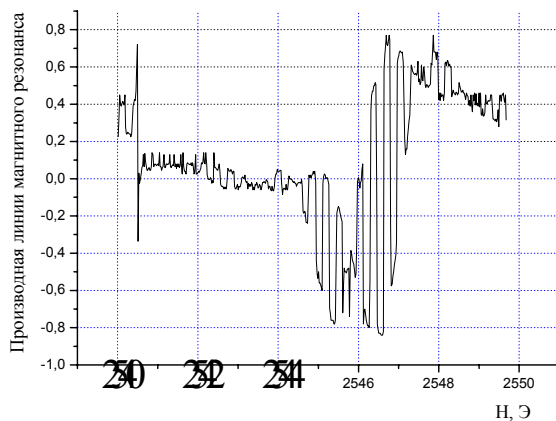


Рисунок 2 – Вид линии магнитного резонанса двухслойной структуры при нулевом электрическом поле. Структура состоит из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 750 мкм



а)

б) 1 - $E = 0$ кВ/см

2 - $E = 23.33$ кВ/см

а) – Вид линии магнитного резонанса при применении импульсного электрического поля $E = 23.33$ кВ/см;

б) – Экстраполированные кривые сдвига линии магнитного резонанса

Рисунок 3 – Вид линии и экстраполированные кривые сдвига линии магнитного резонанса для двухслойной структуры. Структура состоит из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 750 мкм. Сдвиг линии магнитного резонанса $\delta H_E = 1.1 \text{ Э}$

На рисунке 4 приведены результаты эксперимента и теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле (3), сдвига линии магнитного резонанса для двухслойной структуры. При расчетах использовались следующие значения параметров [4]:

для ЖИГ: $m_{S11}=4.8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $m_{S12}=-1.4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $4\pi M_0=1750 \text{ Гс}$;

для ЦТС: $p_{S11}=15.3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $p_{S12}=-5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $p_{d31} = -175 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$;

для ЖИГ - ЦТС: $\lambda_{100}=1.4 \cdot 10^{-6}$.

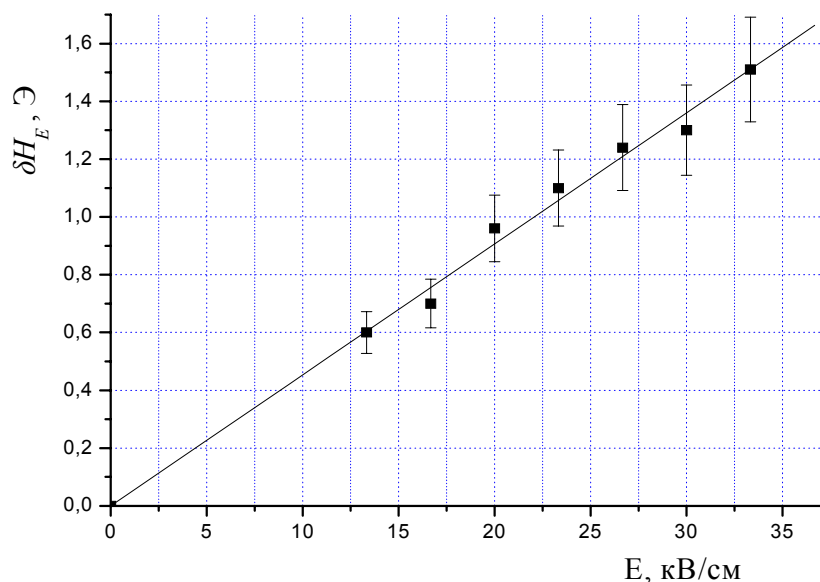


Рисунок 4 – Зависимость сдвига линии магнитного резонанса от напряженности электрического поля для образца, состоящего из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 750 мкм. Точки – эксперимент, линия - теория

На рисунках 5, 6 приведены результаты эксперимента и теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле (3), сдвига линии магнитного резонанса для двухслойного образца, состоящего из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 500 мкм и 250 мкм, соответственно.

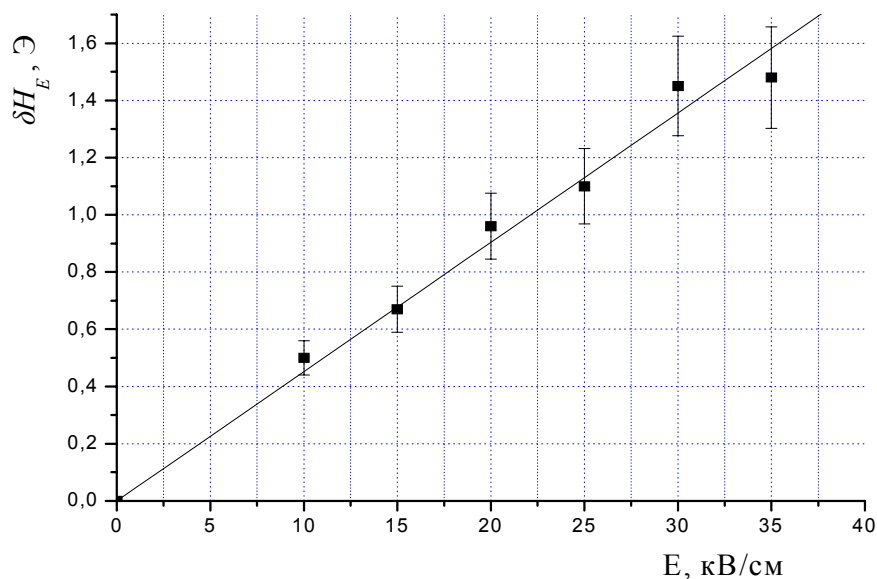


Рисунок 5 – Зависимость сдвига линии магнитного резонанса от напряженности электрического поля для образца, состоящего из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 500 мкм. Точки – эксперимент, линия – теория

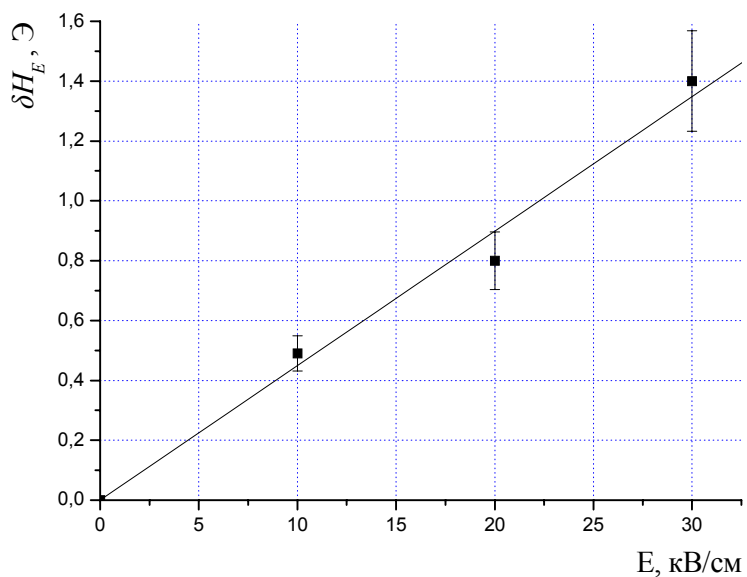


Рисунок 6 – Зависимость сдвига линии магнитного резонанса от напряженности электрического поля для образца, состоящего из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС толщиной 250 мкм. Точки – эксперимент, линия - теория

На рисунке 7 приведена зависимость сдвига линии магнитного резонанса для двухслойной структуры, состоящей из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС переменной толщины.

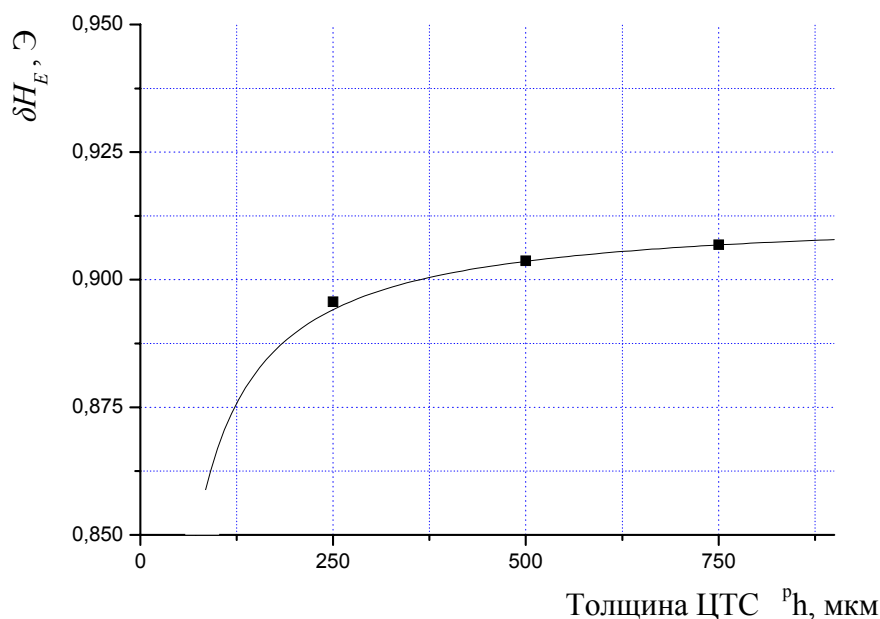


Рисунок 7 – Зависимость сдвига линии магнитного резонанса от толщины пьезоэлектрического слоя для двухслойной структуры, состоящей из слоя ЖИГ толщиной 10 мкм и слоя ЦТС переменной толщиной. Напряженность электрического поля $E = 20$ кВ/см. Точки – эксперимент, линия - теория

Как следует из экспериментальных исследований, наблюдается линейная зависимость сдвига линии магнитного резонанса от электрического поля. Величина эффекта возрастает при увеличении толщины пьезоэлектрика (ЦТС) в составе двухслойной структуры (рис. 7).

Заключение

В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование сдвига линии магнитного резонанса в двухслойных феррит-пьезоэлектрических структурах. Величина сдвига зависит от параметров магнитной и пьезоэлектрической фаз, их процентного состава. Сдвиг резонансной линии линеен по электрическому полю и увеличивается при увеличении процентного содержания пьезоэлектрика в составе структуры. Полученные экспериментальные результаты эффекта для образцов на основе ЖИГ – ЦТС хорошо согласуются с теорией.

Литература

- [1] M. I. Bichurin, I.A. Kornev, V.M. Petrov, A.S. Tatarenko, Yu.V. Kiliba, G. Srinivasan. // Phys. Rev. B. – 2001. – V. 64. - P. 094409;
- [2] О.В. Антоненков, М.И. Бичурин, В.М. Петров, Д.А. Филиппов, Г. Сринивасан Влияние электрического поля на сдвиг линии магнитного резонанса в феррит-пьезоэлектрических структурах // Письма в ЖТФ. - 2005. - Т. 31. - № 15. - С. 90-95;
- [3] М.И. Бичурин, А.А. Браун, Ю.В. Килиба, В.М. Петров, Р.В. Петров Методы измерения магнитоэлектрической восприимчивости в композиционных материалах на СВЧ. Тезисы докладов 2 Всероссийской научно-технической конференции “Методы и средства измерений физических величин”, Часть 1, Нижний Новгород / НГТУ.- 1997.- С. 22- 23;
- [4] S. Shastry, G. Srinivasan, M. I. Bichurin et al. // Phys. Rev. B. - 2004. - V. 70. - P. 064416-1 – 064416-6.