

УДК 537.632, 537.622.4

**ЦИРКУЛЯРНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs<Mn>**© 2014 г. **А.В. Рыков,¹ М.В. Дорохин,^{1,2} Е.И. Малышева,² Ю.А. Данилов^{1,2}**¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского
² Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ

pblket@t-human.com

Поступила в редакцию 24.09.2013

Исследованы температурные зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции светоизлучающих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с дельта-слоем Mn. Дельта-легирование Mn позволяет получить циркулярную поляризацию ЭЛ за счет обменного взаимодействия ионов Mn и дырок в квантовой яме. Полученные зависимости использованы для установления температуры Кюри ферромагнитного слоя и сопоставлены с теорией неупорядоченных ферромагнетиков.

Ключевые слова: спинтроника, спиновые светоизлучающие диоды, ферромагнитные полупроводники.

Введение

Спиновый светоизлучающий диод (ССИД) является одним из базовых приборов спинтроники [1–3]. Принцип его работы заключается в испускании циркулярно-поляризованного рекомбинационного излучения в результате инжекции спин-поляризованных носителей из ферромагнитного инжектора [4]. Таким образом, ССИД может быть использован для изучения материалов спинтроники в применении к полупроводниковым структурам. Важной проблемой при инжекции спин-поляризованных носителей является рассеяние спина (потеря информации о спине) при диффузии. В связи с этой проблемой перспективным вариантом можно назвать прибор, в котором поляризация по спину носителей происходит непосредственно в активной области за счёт обменного взаимодействия между носителями активной области и близкорасположенным встроенным ферромагнитным слоем (дельта-слоем Mn) [2, 5, 6].

Такой прибор был реализован на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с дельта-слоем Mn вблизи активной области. Его недостатком является низкая рабочая температура, не превышающая 50 К. Для повышения рабочей температуры необходим анализ температурных зависимостей степени поляризации ССИД и их теоретическое описание. В работе проведены исследования температурных зависимостей степени поляризации электролюминесценции спиновых светоизлучающих диодов в диапазоне температур 10–90 К.

Целью настоящей работы является получение данных для количественного описания свойств электролюминесценции с точки зрения модели обменного взаимодействия и моделей ферромагнетизма разбавленных ферромагнитных материалов.

Экспериментальная часть

В работе была исследована серия светоизлучающих диодов на основе структур с квантовой ямой InGaAs/GaAs и расположенным на удалении $d_s = 4$ нм дельта-слоем Mn (рис. 1).

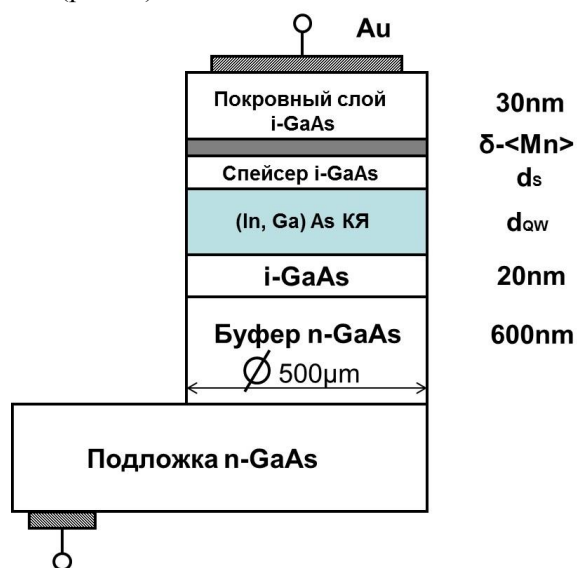


Рис. 1. Схема ССИД с дельта-Mn-слоем

Структуры были изготовлены с помощью комбинирования методов газовой эпитаксии

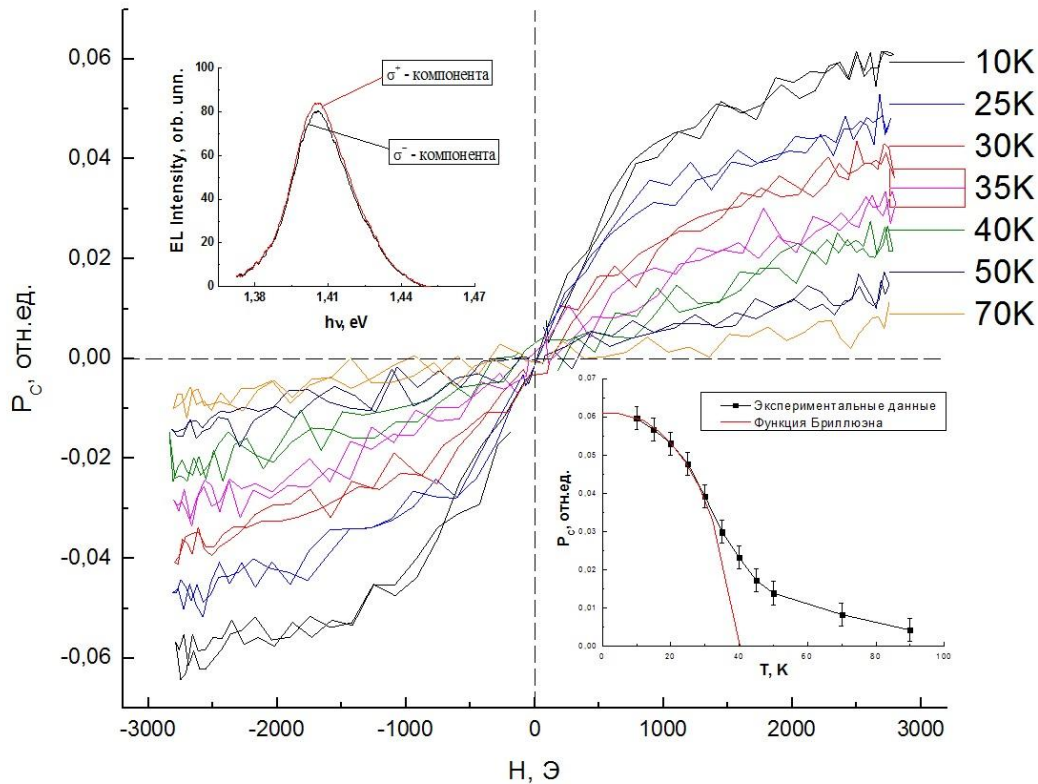


Рис. 2. Магнитооптические зависимости степени поляризации ЭЛ для различных температур. Рабочий ток $I = 10$ мА. На вставках: интенсивности различных компонент поляризации и аппроксимация температурной зависимости поляризации функцией Бриллюэна

и лазерного распыления. Буферный слой GaAs толщиной 0.6 мкм, легированный Si до концентрации $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, был выращен при температуре 650°C на подложке n -GaAs (001) методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Затем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ КЯ (ширина = 10 нм, содержание In $x = 0.12\text{--}0.18$) и тонкий спейсерный слой GaAs были выращены также при 650°C. На следующей стадии дельта<Mn>-легированный слой и покровный слой полуизолирующего GaAs были выращены в том же реакторе при температуре 400°C посредством лазерного распыления Mn- и GaAs-мишеней, соответственно. Толщина покровного GaAs составила 30 нм. Снижение температуры выращивания до 400°C позволило уменьшить диффузию Mn из дельта-слоя во время выращивания покровного GaAs [7]. Содержание Mn в слое оценивалось в долях монослоя (один монослой – МС – соответствует плотности атомов Mn $6.6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и варьировалась в пределах 0.1–0.3 МС.

После нанесения методом термического испарения в вакууме золотых контактов была проведена фотолитография и сформированы меза-структуры диаметром 500 мкм. Далее методом искрового вжигания Sn-фольги был сформирован базовый омический контакт.

С целью повышения концентрации дырок в активной области был изготовлен ряд структур, содержащих дельта-слой углерода вблизи КЯ со стороны подложки. Слоевая концентрация углерода варьировалась в пределах $(0.5\text{--}2.5) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

В работе измерены магнитооптические и температурные зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции. Измерения электролюминесценции проводились в диапазоне температур 10–90 К, на диод подавалось прямое смещение (на Au подаётся положительный относительно базы потенциал). Диапазон рабочих токов составил 1–30 мА.

Значение степени поляризации определялось по относительной интенсивности лево- и правополяризованной компонент циркулярно-поляризованного излучения:

$$P_{\text{ЭЛ}} = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}, \quad (1)$$

где I_+ и I_- – интенсивность левополяризованного и правополяризованного излучения соответственно.

Магнитооптические зависимости степени циркулярной поляризации регистрировались в диапазоне температур 10–90 К и в магнитных полях величиной до 3 кЭ. Магнитное поле было

приложено перпендикулярно плоскости структуры (геометрия Фарадея), излучение регистрировалось со стороны подложки.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации в диапазоне температур 10–70 К для структуры № 3, параметры которой указаны в таблице. Вид зависимости, представленный на рис. 2, подобен для всех исследованных структур. Для кривых характерны два участка: участок быстрого роста (в полях до ~100 Э), который связан с насыщением намагниченности ферромагнитного Mn-слоя, второй участок, предположительно, связан с зеемановским расщеплением уровней в КЯ. Расщепление уровней пропорционально магнитному полю, а их заполнение зависит от температуры.

Ранее было установлено, что из магнитопольевых зависимостей степени поляризации может быть оценена температура Кюри. В работе [8] приводятся результаты измерения температуры Кюри, полученные из исследований аномального эффекта Холла, которые согласуются с оценками T_C по степени поляризации. Согласно этим исследованиям, точке Кюри соответствует значение температуры, при котором пропадает участок быстрого роста. Выше точки Кюри зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией. Для представленного образца при линейной аппроксимации зависимости для температуры Кюри $T_C \approx 50$ К коэффициент корреляции составил $R = 0.959$. Стоит отметить, что на кривых для меньших температур участки в больших полях соответствуют тому же наклону, что связывается с насыщением намагниченности около 0.8 кЭ.

Как правило, в экспериментах по исследованию циркулярно-поляризованной ЭЛ вид магнитопольевой зависимости степени поляризации подобен зависимости намагниченности ферромагнитного инжектора от магнитного поля [9, 10]. В случае исследованных структур такое подобие было подтверждено в [8]. Следовательно, измеренные в работе температурные зависимости степени поляризации подобны температурным зависимостям намагниченности ферромагнитного слоя в структуре. На нижней вставке рис. 2 представлена температурная зависимость степени поляризации, рассчитанная для магнитного поля 3 кЭ, температура T_C приблизительно соответствует точке перегиба зависимости. Данная зависимость была аппрок-

симирована функцией Бриллюэна для температурной зависимости намагниченности [11]:

$$M/M_0 = B_J(\gamma\mu_0\mu_1 M/k_B T), \quad (2)$$

где M_0 – намагниченность насыщения; B_J – функция Бриллюэна; γ – коэффициент Вейсса; μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме; μ_1 – магнитная проницаемость вещества.

Хотя данная функция удовлетворительно описывает экспериментальную зависимость в области низких температур, вблизи T_C имеют место существенные расхождения. Кроме того, значение точки Кюри, найденное из аппроксимации функцией Бриллюэна (здесь 40 К), для многих образцов существенно отличается от значения, найденного из анализа магнитопольевых зависимостей степени поляризации (нижняя вставка рис. 2). По всей видимости, функция Бриллюэна не может быть применена для описания полученных зависимостей, поскольку она описывает поведение намагниченности в упорядоченном магнетике [11]. В рассматриваемой системе расположение атомов Mn в матрице GaAs случайно, потому для описания поведения степени поляризации целесообразно обратиться к теории неупорядоченных ферромагнетиков.

В работе [12] исследуется модель протекания (перколяционная модель) в сильно легированных полупроводниках. Для описания ферромагнетизма вводится понятие магнитных кластеров, состоящих из атома примеси переходного элемента и свободных носителей заряда. В разбавленном ферромагнитном материале эти кластеры перекрываются друг с другом, а относительная намагниченность M/M_0 равна отношению объема перекрывающихся кластеров к общему объему материала. При повышении температуры объем кластеров уменьшается, пропорционально уменьшается и намагниченность. В рамках работы [13] приводится теоретическое описание температурной зависимости намагниченности в неупорядоченном магнетике. Главным образом, эта зависимость характеризуется медленным спадом намагниченности вблизи температуры Кюри, а также различным поведением при разных температурах. Для количественного описания обменного взаимодействия неупорядоченных ферромагнетиков вводится параметр ν_R . Вид температурной зависимости намагниченности определяется величиной этого параметра ν_R , характеризующего дальное действие передачи информации о магнитном моменте посредством обменного взаимодействия:

Таблица

№ образца	$n_C, \text{см}^{-2}$	$d_c, \text{нм}$	Q_{Mn}, MC	x_{In}	$P_{\text{max}}, \%$	T_C, K	ν_R
1	1.2×10^{12}	20	0.1	0.16	5.4	45	2×10^{-3}
2	2.5×10^{12}	20	0.1	0.16	4.3	40	5×10^{-3}
3	5×10^{12}	20	0.1	0.16	6	50	5×10^{-3}
4	5×10^{11}	4	0.1	0.12	10	50	2×10^{-3}
5	5×10^{11}	20	0.1	0.25	3.5	35	2×10^{-3}
6	5×10^{11}	20	0.1	0.12	6.7	40	2×10^{-3}
7	5×10^{11}	20	0.1	0.18	2.5	40	2×10^{-3}
8	0	5	0.3	0.12	13	35	5×10^{-3}

n_C – содержание углерода в дельта-слое углерода (если указанное значение равно 0, дельта-слой введён не был); d_c – толщина спейсерного слоя GaAs между КЯ и $\delta\langle C \rangle$; Q_{Mn} – содержание атомов Mn в дельта-слое; x_{In} – содержание индия в квантовых ямах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; P_{max} – степень поляризации при 3 кЭ и $T = 10 \text{ K}$; T_C – определённое экспериментально значение температуры Кюри; ν_R – параметр взаимодействия в неупорядоченных ферромагнетиках.

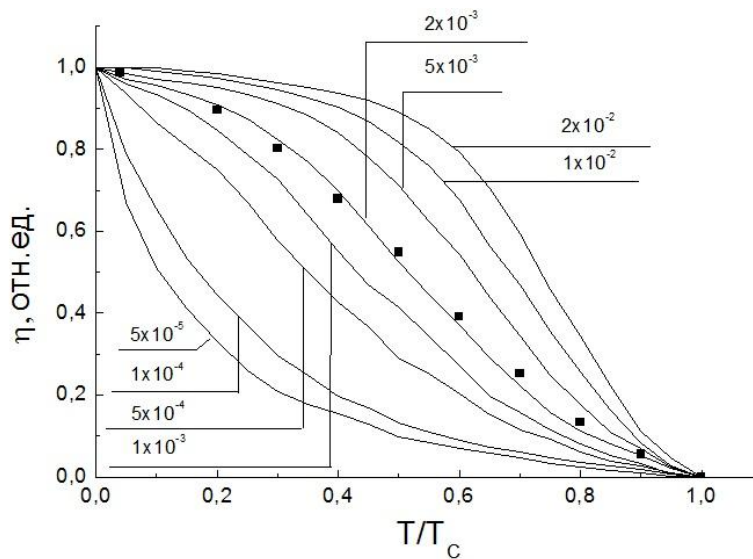


Рис. 3. Рассчитанные (линии) и измеренные экспериментально (точки) температурные зависимости относительного параметра намагниченности. Для теоретически рассчитанных кривых $\eta = M(T)/M(0)$, для экспериментальных точек $\eta = P(T)/P(0)$, где P – степень циркулярной поляризации, пропорциональная намагниченности. Теоретические линии соответствуют разным значениям параметра ν_R

$$\nu_R = (4/3)\pi n R^3, \quad (3)$$

где n – концентрация магнитной примеси, R – характерный радиус обменного взаимодействия между атомами.

Величина R характеризует расстояние от атома ферромагнитной примеси, на котором потенциал обменного взаимодействия уменьшается в e раз. В разбавленных ферромагнетиках параметр определяет скорость уменьшения объёма магнитных кластеров с ростом температуры [13, с. 249]. Таким образом, параметр ν_R характеризует эффективность взаимодействия между близкорасположенными атомами и определяет важнейшие свойства ферромагнетика: вид температурной зависимости и точку Кюри. Чем больше этот параметр по значению,

тем медленнее падает намагниченность с повышением температуры.

Измерение температурной зависимости намагниченности позволяет отнести ферромагнетизм в исследуемых системах к тому или иному механизму. В нашем случае для установления механизмов ферромагнитного упорядочения в структурах с дельта-слоем Mn предложено исследование температурной зависимости степени циркулярной поляризации ССИД, т.к. данный параметр пропорционален намагниченности близкорасположенного ферромагнитного дельта-слоя [3, 8]. На рис. 3 построены температурные зависимости относительной намагниченности, рассчитанные согласно [12] и [13] для различных значений ν_R . Также на графике построена экспериментальная зависимость степени

циркулярной поляризации от температуры, нормированная на 1 по осям абсцисс и ординат. Степень поляризации рассчитана при значении магнитного поля 3 кЭ (соответствующем насыщению намагниченности).

На рис. 3 видно, что экспериментальные точки (образец № 3) могут быть достаточно достоверно описаны теоретическими зависимостями для параметра $\nu_R \approx 2 \times 10^{-3}$. Полученные на рис. 3 кривые намагниченности были сопоставлены с температурными зависимостями степени поляризации для структур с различным содержанием Mn, а для структур с дополнительным легированием углеродом – с различным содержанием C (определяющим концентрацию дырок). Результаты показаны в таблице. Для образцов с различным содержанием Mn линейная зависимость параметра ν_R от концентрации Mn удовлетворительно согласуется с результатами измерений: при содержании в 0.1 и 0.3 моно-слоя параметр ν_R равен 2×10^{-3} и 5×10^{-3} соответственно. Увеличение содержания Mn нецелесообразно, поскольку сопряжено с формированием дефектов, в первую очередь междоузельных атомов Mn, снижающих общую концентрацию дырок и приводящих к гашению интенсивности ЭЛ, как показано в [14].

Повышение концентрации носителей (т.е. введение дополнительной немагнитной лигатуры) приводит к росту значения ν_R с увеличением концентрации дырок. На работе прибора это отражается в повышении его стабильности при низких температурах. При этом формула для ν_R не учитывает концентрации носителей, поскольку введена для случая разбавленных магнитных металлов с большой концентрацией свободных носителей. При описании разбавленных магнитных полупроводников с помощью перколяционной теории необходим учёт концентрации свободных носителей.

Заключение

Дельта-легирование Mn позволяет получить циркулярную поляризацию ЭЛ в ГС с КЯ In-GaAs/GaAs за счет эффекта обменного взаимодействия ионов Mn и дырок в квантовой яме. Поляризация наблюдается при температурах ниже температуры Кюри ферромагнитного дельта-слоя (35–50 К).

Температурные зависимости степени циркулярной поляризации свидетельствуют в пользу перколяционной модели ферромагнетизма дельта-Mn-слоя в GaAs. Так как перколяционная модель описывает неупорядоченные ферромагнитные металлы, встает вопрос о переносе этой теории на полупроводники, и в первую очередь следует учесть влияние концентрации носителей на параметры модели.

Коллектив авторов выражает благодарность Б.Н. Звонкову за изготовление экспериментальных образцов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (13-07-00982) и гранта Президента РФ (МК-2708.2013.2).

Список литературы

1. Yu Z.G., Lau W.H., Flatte M.E. Circularly polarized electroluminescence in spin-LED structures Preprint // Cond. Mat. 2003. N. 0308220.
2. Myers R.C., Gossard A.C., Awschalom D.D. // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. 161305(R).
3. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A., Demina P.B. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41 P. 24.
4. Schmidt G. Concepts for spin injection into semiconductor – a review // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R107-R122.
5. Корнев В.Л. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. № 9. С. 1053.
6. Зайцев С.В., Дорохин М.В., Бричкин А.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 10. С. 730.
7. Danilov Yu.A., Drozdov M.N., Drozdov Yu.N. et al. // J. of Spintronics and Magnetic Materials. 2012. V. 1. P. 1–3.
8. Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 14. С. 8.
9. Young D.K., Gupta J.A., Johnston-Halperin E., et al. // Semicond. Sci. Tech. 2002. V. 17. P. 275–284.
10. Прокофьева М.М., Дорохин М.В., Данилов Ю.А. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76, вып. 2. С. 255–258.
11. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.
12. Holcomb D.F., Rehr J.J., Jr. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 183. P. 773.
13. Коренбит И.Я., Шендер Е.Ф. // УФН. 1978. Т. 126. С. 233–268.
14. Дорохин М.В., Зайцев С.В., Бричкин А.С. и др. // ФТТ. 2010. Т. 52, вып. 11. С. 2147.

**ELECTROLUMINESCENCE CIRCULAR POLARIZATION
OF LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON GaAs<Mn>***A.V. Rykov, M.V. Dorokhin, E.I. Malysheva, Yu.A. Danilov*

The temperature dependences of electroluminescence (EL) circular polarization degree of the light-emitting diodes based on InGaAs/GaAs heterostructures and delta-doped with a Mn layer have been studied. Mn delta-doping provides EL circular polarization due to the exchange interaction between Mn ions and holes in the quantum well. The dependences obtained are used to determine the Curie temperature of the ferromagnetic layer and they are compared with the theory of disordered ferromagnets.

Keywords: spintronics, spin light-emitting diodes, ferromagnetic semiconductors.

References

1. Yu Z.G., Lau W.H., Flatte M.E. Circularly polarized electroluminescence in spin-LED structures Preprint // *Cond. Mat.* 2003. N. 0308220.
2. Myers R.C., Gossard A.C., Awschalom D.D. // *Phys. Rev. B.* 2004. V. 69. P. 161305(R).
3. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A., Demina P.B. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41 P. 24.
4. Schmidt G. Concepts for spin injection into semiconductor – a review // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. P. R107-R122.
5. Korenev V.L. // *Pis'ma v ZhETF.* 2003. T. 78. № 9. S. 1053.
6. Zajcev S.V., Dorohin M.V., Brichkin A.S. i dr. // *Pis'ma v ZhJeTF.* 2009. T. 90. № 10. S. 730.
7. Danilov Yu.A., Drozdov M.N., Drozdov Yu.N. et al. // *J. of Spintronics and Magnetic Materials.* 2012. V. 1. P. 1–3.
8. Vihrova O.V., Danilov Ju.A., Dorohin M.V. i dr. // *Pis'ma v ZhTF.* 2009. T. 35. № 14. S. 8.
9. Young D.K., Gupta J.A., Johnston-Halperin E., et al. // *Semicond. Sci. Tech.* 2002. V. 17. P. 275–284.
10. Prokof'eva M.M., Dorohin M.V., Danilov Ju.A. i dr. // *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja.* 2012. T. 76, vyp. 2. S. 255–258.
11. Vonsovskij S.V. *Magnetizm. M.: Nauka,* 1971. 1032 s.
12. Holcomb D.F., Rehr J.J., Jr. // *Phys. Rev. Lett.* 1969. V. 183. P. 773.
13. Korenblit I.Ja., Shender E.F. // *UFN.* 1978. T. 126. S. 233–268.
14. Dorohin M.V., Zajcev S.V., Brichkin A.S. i dr. // *FTT.* 2010. T. 52, vyp. 11. S. 2147.