

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.622.4

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11814>**Спонтанный фотомагнитоэлектрический эффект в эпитаксиальных слоях ферромагнитного GaMnAs**П. Б. Парчинский^{1✉}, А. С. Газизулина¹, Р. А. Нусретов²¹Национальный университет Узбекистана,
ул. Университетская, 4, Ташкент 100174, Узбекистан²Узбекско-Японский молодежный центр инноваций,
ул. Университетская, 2-В, Ташкент 100095, Узбекистан**Аннотация**

В настоящей работе приводятся результаты исследования спонтанного фотомагнитоэлектрического (ФМЭ) эффекта в эпитаксиальных слоях GaMnAs, находящихся в состоянии ферромагнитного упорядочения. Целью работы являлось изучение температурной зависимости спонтанного ФМЭ эффекта, определяемого вдоль кристаллических осей [110] и $[1\bar{1}0]$.

Объектом исследования служили слои GaMnAs с содержанием Mn 2.9 атомных процента, полученные методом низкотемпературной молекулярно лучевой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs (001). Показано, что при температурах ниже температуры Кюри, при освещении исследованных эпитаксиальных слоев GaMnAs в них возникает поперечная разность потенциалов (фотоЭДС). Возникновение этой фотоЭДС связано с фотомагнитоэлектрическим эффектом, заключающимся в разделении фотогенерированных носителей заряда собственным магнитным полем полупроводниковой матрицы, находящейся в состоянии ферромагнитного упорядочения.

Впервые определена температурная зависимость собственного фотомагнитоэлектрического эффекта, измеренного вдоль кристаллографических осей [110] и $[1\bar{1}0]$ эпитаксиального слоя GaMnAs. Обнаружено, что величина фотоЭДС, измеренная вдоль кристаллической оси [110], демонстрирует максимум при температурах 35–40 К, в то время как величина фотоЭДС, определённая вдоль оси $[1\bar{1}0]$, монотонно увеличивается с понижением температуры. Немонотонный характер температурной зависимости фотомагнитоэлектрического эффекта, наблюдаемый вдоль оси [110], может быть обусловлен переориентацией оси легчайшего намагничивания исследуемого образца с понижением температуры.

Ключевые слова: GaMnAs, фотомагнитоэлектрический эффект, молекулярно-лучевая эпитаксия, ферромагнитное упорядочение, температура Кюри, фотопроводимость

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Агенства Инновационного развития при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан в рамках научного проекта № FZ-2020092435.

Для цитирования: Парчинский П. Б., Газизулина А. С., Нусретов Р. А. Спонтанный фотомагнитоэлектрический эффект в эпитаксиальных слоях ферромагнитного GaMnAs. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 111–116. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11814>

For citation: Parchinskiy P. B., Gazizulina A. S., Nusretov R. A. Spontaneous photomagnetolectric effect in ferromagnetic GaMnAs epitaxial layers. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 111–116. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11814>

✉ Парчинский Павел Борисович, e-mail: p.parchinskiy@nuu.uz

© Парчинский П. Б., Газизулина А. С., Нусретов Р. А., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые твердые растворы GaMnAs, полученные при помощи метода низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии (НТ МЛЭ), привлекают значительный интерес исследователей, работающих в области полупроводникового материаловедения. Интерес к этим материалам обусловлен тем, что в условиях роста эпитаксиальных слоев при низких (250–300 °С) температурах возможно получение твердых растворов GaMnAs с концентрацией Mn, многократно превышающей предел его растворимости в полупроводниковой матрице арсенида галлия [1–2]. Присутствие значительной концентрации магнитных ионов Mn делает возможным возникновение состояния ферромагнитного упорядочения в эпитаксиальных слоях GaMnAs, в результате чего данные материалы обладают комбинацией полупроводниковых и магнитных свойств, недостижимой для материалов, получаемых традиционными методами [3–5].

Как известно, наличие спонтанной намагниченности при температурах ниже температуры Кюри (T_c) в ферромагнитных материалах делает возможным возникновение в этих материалах собственных (спонтанных) гальваномагнитных эффектов, наблюдаемых в отсутствие внешнего магнитного поля [6–8]. Среди таких эффектов в GaMnAs наиболее изученными являются эффект Холла и Эффект Нернста, получившие названия аномальный (спонтанный) эффект Холла и аномальный эффект Нернста [9–11]. В то же время необходимо отметить, что в эпитаксиальных слоях GaMnAs, полученных методом НТ МЛЭ на подложках GaAs, реализуется возможность возникновения спонтанного фотомагнитоэлектрического (ФМЭ) эффекта, заключающегося в возникновении поперечной разности потенциалов (фотоЭДС) при освещении данных материалов при нулевых значениях внешнего магнитного поля [12]. Действительно, в эпитаксиальных GaMnAs, выращенных на подложках GaAs, ось легчайшего намагничивания, а, следовательно, и вектор спонтанной намагниченности M_0 , лежат в плоскости пленки [13, 14]. Тогда при освещении поверхности эпитаксиального слоя, поток фотогенерированных носителей заряда, направленный от поверхности в глубину объема эпитаксиального слоя, будет перпендикулярен вектору M_0 , что обуславливает возможность возникновения поперечной фотоЭДС. Однако к настоящему моменту фотомагнитоэлектрические

эффекты в GaMnAs остаются практически неисследованными. В связи с вышесказанным целью настоящей работы являлось изучение возможности наблюдения спонтанного ФМЭ эффекта в эпитаксиальных слоях GaMnAs, находящихся в состоянии ферромагнитного упорядочения, а также исследование зависимости величины этого эффекта от температуры и кристаллографической ориентации.

2. Экспериментальная часть

Исследованные в данной работе эпитаксиальные слои GaMnAs были получены посредством метода НТ МЛЭ на полуизолирующей GaAs (001) подложке. Перед нанесением слоев GaMnAs для залечивания дефектов подложки при температуре $T_s = 580–600$ °С выращивался буферный слой GaAs толщиной 200 нм. Затем температура подложки опускалась до 250 °С для выращивания слоев GaMnAs. Толщина получаемых эпитаксиальных слоев GaMnAs составляла 300 нм. В целом технология получения эпитаксиальных слоев, исследуемых в данной работе, аналогична описанной в [15]. Качество получаемых слоев контролировалось при помощи метода рентгеноструктурного анализа и, в процессе выращивания, при помощи метода отраженных быстрых электронов. Оба метода показали, что полученные эпитаксиальные пленки являются кристаллически однородными и не содержат включений дополнительных кристаллических фаз. Концентрация Mn в GaMnAs определялась при помощи энергодисперсионного рентгеновского (EDX) детектора электронного микроскопа JEOL JSM IT 200 и составляла 2.9 атомных процента. Для исследования магнитотранспортных свойств и ФМЭ эффекта на поверхности образцов при помощи фотолинтографии был сформирован рисунок, состоящий из двух взаимно перпендикулярных полос с боковыми контактами (так называемый мостик Холла). Данные полоски были ориентированы вдоль кристаллических осей [110] и $[1\bar{1}0]$. Для создания контактов к поверхности GaMnAs использовался индиевый припой, наносимый на поверхность эпитаксиального слоя при температурах 220–230 °С.

3. Результаты и обсуждение

Значение температуры Кюри (T_c) исследуемого эпитаксиального слоя определялось из температурной зависимости его сопротивления (R). Авторами [16] было показано, что в окрестностях перехода парамагнетик – ферромагнетик

на температурных зависимостях $R(T)$ в GaMnAs наблюдается особенность в виде точки перегиба, связанная с изменением доминирующего механизма рассеяния носителей заряда. Положение данной точки перегиба позволяет с высокой точностью определить значение T_C . На рис. 1 представлены температурные зависимости сопротивления $R(T)$ и его первой производной $dR(T)/dT$ исследуемого эпитаксиального слоя GaMnAs. Измерение зависимости $R(T)$ проводилось в темноте, в отсутствие внешнего магнитного поля. Для удобства представления величина $R(T)$ нормирована к величине $R(300)$, где $R(300)$ – сопротивление образца при комнатной температуре. Значения $dR(T)/dT$ определялись численным дифференцированием зависимости $R(T)$.

На представленной на рис. 1б температурной зависимости $dR(T)/dT$ наблюдается ярко выраженный минимум, соответствующий точке перегиба на зависимости $R(T)$. Положение этого минимума позволяет определить значение температуры Кюри исследуемого эпитаксиального слоя T_C в интервале 80–85 К. Отметим, что при температурах выше T_C сопротивление образца монотонно увеличивается с понижением температуры, что свидетельствует о полупроводниковом характере электропроводности исследуемых эпитаксиальных слоев GaMnAs.

Для исследования ФМЭ эффекта исследуемые образцы освещались светом белого светодиода, интенсивность освещения контролировалась величиной тока I_L , протекающего через светодиод. Освещение образцов сопровождалось уменьшением их сопротивления, что свидетельствует о наличии в GaMnAs эффектов фотопроводимости. На рис. 2 представлена температурная зависимость фотопроводимости исследуемых образцов, определенная при значении $I_L = 1–3$ мА. Фотопроводимость образцов характеризовалась величиной ΔR , определяемой как $\Delta R = (R_1 - R_0)/R_0$, где R_0 – представляет собой темновое сопротивление образца, R_1 – сопротивление образца при включенном светодиоде. Как видно из представленных зависимостей, фотопроводимость в исследованных образцах начинает наблюдаться при температурах около 100 К, при этом величина ΔR монотонно увеличивается с понижением температуры измерений. Такое поведение температурной зависимости фотопроводимости кажется достаточно ожидаемым, если учесть, что при полупроводниковом характере электропроводности концентрация носителей заряда монотонно уменьшается с понижением температуры.

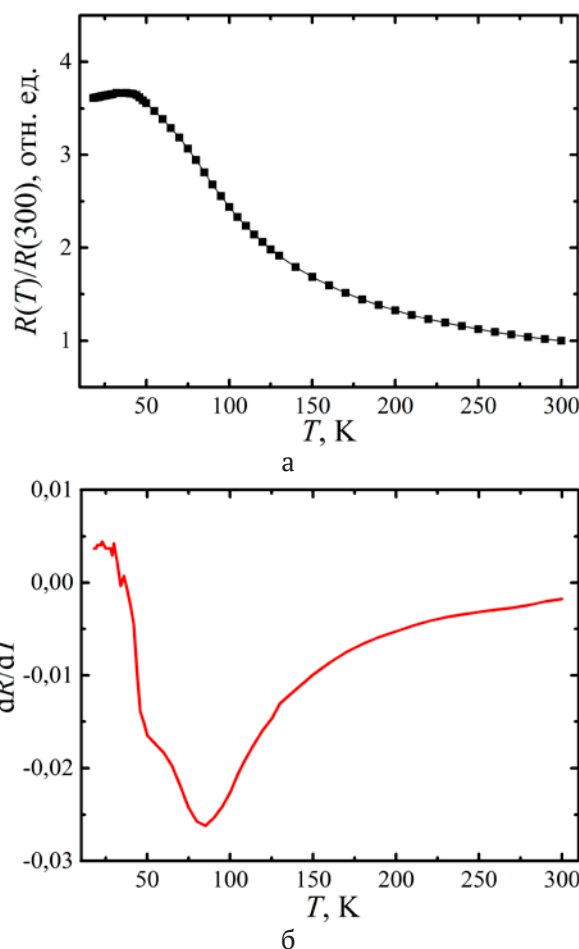


Рис. 1. а – температурная зависимость сопротивления эпитаксиального слоя GaMnAs, нормированного к величине сопротивления, определенного при 300 К ($R(300)$); б – температурная зависимость величины dR/dT эпитаксиального слоя GaMnAs

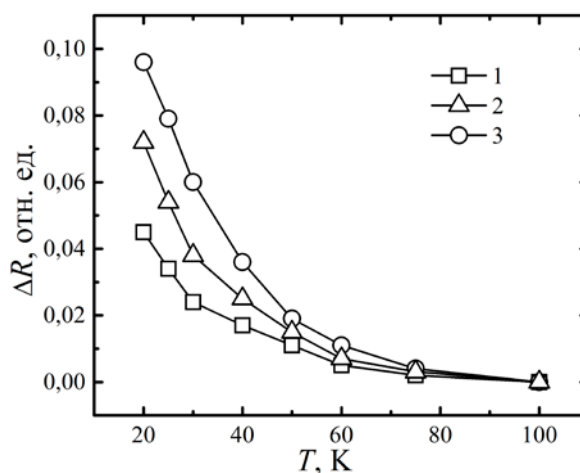


Рис. 2. Температурная зависимость фотопроводимости GaMnAs, измеренная при различных значениях протекающего через светодиод тока: 1 – $I_L = 1$ мА; 2 – $I_L = 2$ мА; 3 – $I_L = 3$ мА

Очевидно, что если число фотогенерированных носителей заряда в полупроводниковой матрице не зависит (или слабо зависит) от температуры, то разность между световым и темновым сопротивлением образца и, следовательно, величина ΔR будут увеличиваться с понижением температуры. В то же время при температурах выше 100 К концентрация фотогенерируемых носителей заряда пренебрежимо мала по сравнению с термодинамически равновесной концентрацией носителей заряда в GaMnAs, вследствие чего эффект фотопроводимости при этих температурах практически отсутствует.

На рис. 3 представлены зависимости величины фотоЭДС – U_1 в исследованном эпитаксиальном слое от температуры, измеренные вдоль кристаллических осей $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ при значениях $I_L = 2$ и 3 мА. Из представленных зависимостей видно, что величина U_1 растет с увеличением освещенности поверхности образца. Тот факт, что фотоЭДС в исследуемых образцах начинает наблюдаться только при температурах ниже T_C , на наш взгляд, свидетельствует о том, что данная фотоЭДС обусловлена ФМЭ эффектом, возникающим вследствие разделения потока фотогенерированных носителей заряда собственным магнитным полем полупроводниковой матрицы, находящейся в состоянии ферромагнитного упорядочения. Отметим, что величина U_1 , измеренная вдоль кристаллографической оси $[1\bar{1}0]$, равномерно увеличивается с понижением температуры, в то время как на температурной зависимости величины U_1 , измеренной вдоль оси

$[110]$, наблюдается локальный максимум при температурах 34–36 К.

Различие в характере температурной зависимости величины U_1 , измеренной вдоль различных кристаллических осей, можно объяснить принимая во внимание тот факт, что величина ФМЭ эффекта зависит как от абсолютной величины вектора M_0 , так и от его ориентации относительно направления, вдоль которого проводятся измерения. Очевидно, что при заданном значении намагниченности образца, значение U_1 будет изменяться от максимальных значений – в случае, когда измерения будут проводиться в направлении перпендикулярном направлению вектора M_0 , до нуля – в случае, когда измерения будут проводиться вдоль направления, совпадающего с направлением вектора M_0 . В отсутствие внешнего магнитного поля вектор намагниченности будет ориентирован в направлении оси легчайшего намагничивания образца. В GaMnAs степень ферромагнитного упорядочения, а следовательно, и абсолютная величина вектора M_0 монотонно увеличиваются с понижением температуры. В то же время согласно существующим экспериментальным данным в эпитаксиальных слоях GaMnAs, находящихся в состоянии ферромагнитного упорядочения, ориентация оси легчайшего намагничивания не является постоянной, а зависит от доминирующего типа магнитокристаллической анизотропии, и изменяется при изменении температуры [17, 18]. При независимой от температуры концентрации фотогенерированных носителей заряда температурная зависимость величины U_1 будет с одной стороны определяться температурной зависимостью абсолютной величины вектора M_0 , с другой – температурной зависимостью его ориентации относительно кристаллографических осей $[110]$ и $[1\bar{1}0]$. С учетом вышесказанного, немонотонность температурной зависимости U_1 , наблюдаемая вдоль оси $[110]$, может быть обусловлена уменьшением угла между вектором M_0 и данной кристаллографической осью при температурах 35–40 К. При этом угол между вектором намагниченности образца и кристаллографической осью $[1\bar{1}0]$, напротив, увеличивается, о чем свидетельствует увеличение скорости изменения значений U_1 , наблюдаемое для данной оси при тех же значениях температуры. Данная ситуация может быть, в частности, реализована, если при понижении температуры происходит переориентация оси легчайшего намагничивания в плоскости эпитаксиального слоя от направле-

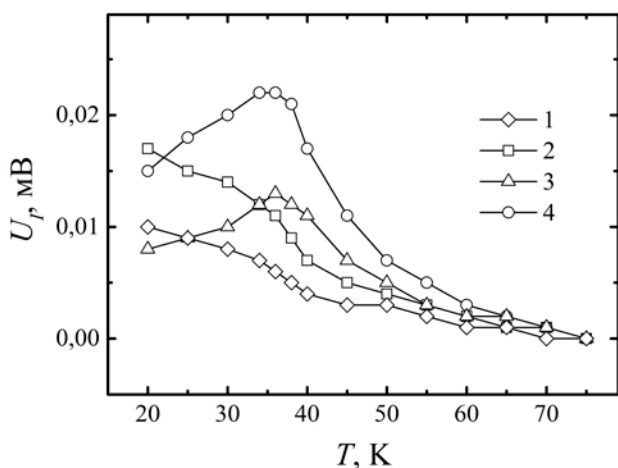


Рис. 3. Температурная зависимость величины фотоЭДС, измеренная вдоль кристаллических осей $[1\bar{1}0]$ (кривые 1 и 2) и $[110]$ (кривые 3 и 4) при значениях $I_L = 2$ мА; (кривые 1 и 3) и $I_L = 3$ мА (кривые 2 и 4)

ния $\langle 110 \rangle$ к направлению $\langle 100 \rangle$, наблюдаемая в GaMnAs авторами работ [17–19].

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что при температурах ниже T_c при освещении исследованных эпитаксиальных слоев GaMnAs, в них возникает поперечная фотоЭДС, которая может быть обусловлена спонтанным ФМЭ эффектом в полупроводниковой матрице, находящейся в состоянии ферромагнитного упорядочения. Данный эффект связан с взаимодействием потока фотогенерированных носителей заряда с собственным магнитным полем полупроводниковой матрицы. Авторами впервые были проведены исследования температурной зависимости спонтанного ФМЭ эффекта для кристаллографических осей $[110]$ и $[1\bar{1}0]$. Показано, что температурная зависимость величины ФМЭ эффекта, измеренного вдоль кристаллических осей $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ эпитаксиального слоя GaMnAs, имеет существенно различный характер. Наблюдаемые различия связаны, на наш взгляд, с тем, что величина спонтанного ФМЭ эффекта определяется как абсолютной величиной намагниченности образца, так и ориентацией вектора намагниченности M_0 относительно кристаллических осей эпитаксиального слоя, вдоль которых проводились измерения величины фотоЭДС. В этом случае немонотонный характер величины фотоЭДС, измеренной вдоль кристаллической оси $[110]$, может быть обусловлен изменением ориентации оси легчайшего намагничивания эпитаксиального слоя от направления $\langle 110 \rangle$ к направлению $\langle 100 \rangle$, наблюдаемого при понижении температуры, сопровождаемого уменьшением угла между направлением вектора спонтанной намагниченности и кристаллической осью $[110]$.

Заявленный вклад авторов

Парчинский П. Б. – научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы, проведение исследования, написание и редактирование текста. Газизулина А. С. – проведение исследования, обработка результатов исследования, написание и редактирование текста, подготовка статьи к публикации. Нусретов Р. А. – проведение исследования, обработка и интерпретация результатов исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных

отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

- Ohno H. Making nonmagnetic semiconductors ferromagnetic. *Science*. 1998;281(5379): 951–956. <https://doi.org/10.1126/science.281.5379.951>
- Pross A., Bending S., Edmonds K., Champion R. P., Foxon C. T., Gallaher B. Magnetic domain imaging of ferromagnetic GaMnAs films. *Journal of Applied Physics*. 2004;95(11): 7399–7401. <https://doi.org/10.1063/1.1669113>
- Иванов В. А., Аминов Т. Г., Новоторцев В. М., Калинин В. Т. Спинтроника и спинтронные материалы. *Известия академии наук. Серия химическая*. 2004;11: 2255–2303.
- Men'shov V. K., Tugushev V. V., Caprara S., Chulkov E. V. Proximity-induced spin ordering at the interface between a ferromagnetic metal and a magnetic semiconductor. *Physical Review B*. 2010;81(23): 235212. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.235212>
- Димитриев Г. С., Крайнов И. В., Сапега В. Ф., Аверкиев Н. С., Debus J., Lahderanta E. Энергетическая структура одиночного акцептора Mn в GaAs:Mn. *Физика твердого тела*. 2018;60(8): 1556–1565. <https://doi.org/10.21883/FIT.2018.08.46242.22Gr>
- Onoda S., Sugimoto N., Nagaosa N. Quantum transport theory of anomalous electric, thermoelectric, and thermal Hall effects in ferromagnets. *Physical Review B*. 2008;77(16): 165103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.165103>
- Nagaosa N., Sinova J., Onoda S., MacDonald A. H., Ong N. P. Anomalous Hall effect. *Reviews of Modern Physics*. 2010;82(2): 1539–1592. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.1539>
- Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Prejbeanu I.-L., Dieny B., Pirro P., Hillebrands B. Review on spintronics: Principles and device applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020;509: 166711. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
- Pu Y., Chiba D., Matsukura F., Ohno H., Shi J. Mott relation for Anomalous Hall and Nernst effects in $Ga_{1-x}Mn_xAs$ ferromagnetic semiconductors. *Physical Review Letters*. 2008;101(11): 117208. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.117208>
- Chiba D., Nishitani Y., Matsukura F., Ohno H. Properties of $Ga_{1-x}Mn_xAs$ with high Mn composition ($x > 0.1$). *Applied Physics Letters*. 2007;90(12): 122503. <https://doi.org/10.1063/1.2715095>
- Chiba D., Werpachowska A., Endo M., Nishitani Y., Matsukura F., Dietl T., Ohno H. Anomalous Hall Effect in Field-Effect Structures of (Ga,Mn)As. *Physical Review Letters*. 2010;104(10): 106601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.106601>
- Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. *Физика полупроводников*. М.: Наука; 1990. 688.

13. Brunner K., Gould C., Schmidt G., Molenkamp L. W. Structure, ferromagnetism and magnetotransport of epitaxial (Ga,Mn)As/GaAs structures. *Physica Status Solidi (a)*. 2006;203(14): 3565–3573. <https://doi.org/10.1002/pssa.200622382>

14. Sadowski J., Domagała J. Z., ... Ilver L. Structural properties of MBE grown GaMnAs layers. *Thin Solid Films*. 2000;367(1-2): 165–167. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00681-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00681-7)

15. Yoon I. T., Kang T. W., Kim D. J. Analysis of magnetic field dependent mobility in ferromagnetic $Ga_{1-x}Mn_xAs$ layers. *Solid State Communications*. 2006;137(3): 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2005.10.004>

16. Kojima E., Héroux J. B., ... Kuwata-Gonokami M. Experimental investigation of polaron effects in $Ga_{1-x}Mn_xAs$ by time-resolved and continuous-wave midinfrared spectroscopy. *Physical Review. B*. 2007;76(19): 195323. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.195323>

17. Wang K. Y., Edmonds K. W., Campion R. P., Zhao L. X., Foxon C. T., Gallagher B. L. Anisotropic magnetoresistance and magnetic anisotropy in high-quality (Ga,Mn)As films. *Physical Review. B*. 2005;72(8): 085201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.085201>

18. Hamaya K., Taniyama T., Kitamoto Y., Moriya R., Munekata H., Magnetotransport study of

temperature dependent magnetic anisotropy in a (Ga,Mn)As epilayer. *Journal of Applied Physics*. 2003;94(12): 7657–7661. <https://doi.org/10.1063/1.1629134>

19. Lee S., Lee S., Bac S.-K., Choi S., Liu X., Dobrowolska M., Furdyna J. K. Spin-orbit-induced effective magnetic field in GaMnAs ferromagnetic semiconductor. *IEEE Transactions on Magnetism*. 2019;55(2): 2400206. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2862867>

Информация об авторах

Парчинский Павел Борисович, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников и полимеров, Национальный университет Узбекистана (Ташкент, Узбекистан).

<https://orcid.org/0009-0008-3812-9383>
p.parchinskiy@nuu.uz

Газизулина Алиса Сергеевна, м. н. с. кафедры физики полупроводников и полимеров, Национальный университет Узбекистана (Ташкент, Узбекистан).

<https://orcid.org/0009-0003-8598-2479>
alice.galashina@gmail.com

Нусретов Рафаэль Айдинович, к. ф.-м. н., н. с. Узбекско-Японского молодежного центра инноваций (Ташкент, Узбекистан).

<https://orcid.org/0000-0002-4007-2039>
rnusretov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 18.05.2023; принята к публикации 15.06.2023; опубликована онлайн 25.03.2023.