Анизотропия транспортных и магнитотранспортных свойств эпитаксиальных слоев GaMnAs, полученных методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии

П.Б. Парчинский[*,1], А.А. Насиров[1], А.С. Газизулина[1], А. Арсланов[1], Dojin Kim[2], О.М. Турсункулов[3]

[1] Национальный университет Узбекистана, ул. Университетская 4, 100176, Ташкент, Узбекистан
[2] ChungnamNationalUniversity, Yuseong-ku, 305-764, Taejon, Korea
[3] Центр передовых технологий, ул. Университетская 7, 100174, Ташкент, Узбекистан

Получена 27 07.2021

* Corresponding author: e-mail pavelphys@mail.ru,Phone: +998935405759

В настоящей работе приводятся результаты измерения температурной зависимости сопротивления твердых растворов $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ со значением x=0.0156. Установлено, что температурные зависимости сопротивления, измеренные вдоль кристаллических осей [110] и [1$\bar{1}$0] в области температур ниже 150 К, носят существенно различный характер. Показано, что при температурах ниже температуры Кюри данные различия могут быть связаны с анизотропией магнитных свойств эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, тогда как при температурах выше температуры Кюри, наблюдаемые различия могут быть связаны с анизотропией подвижности носителей заряда, возникающей из-за наличия в объеме эпитаксиального слоя пространственно ориентированных структур.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, GaMnAs, магнетосопротивление, ферромагнитное упорядочения, анизотропия.

The temperature dependence of a resistance in solid solution $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ with the x=0.0156 have been presented. It was established that the temperature dependence of the resistance measured along the crystal axes [110] and [1$\bar{1}$0] in the temperature range below 150 K are significantly different. It was shown that at the temperatures below the Curie temperature observed difference can be associated with the anisotropy of the magnetic properties of the $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ epitaxial layer, whereas at temperatures above the Curie temperature it may be related to the anisotropy of the mobility of charge carriers that occurs due to the presence of spatially oriented structures in the volume of the epitaxial layer.

Keywords : molecular beam epitaxy, GaMnAs, magnetoresistance, ferromagnetic state, anisotropy.

https//doi.org/10.52304/.v23i2.236

I. Введение

С момента открытия перехода ферромагнетик-парамагнетик в твердых растворах $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, полученных методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии (НТ МЛЭ), $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ привлекает значительное внимание исследователей, работающих в области полупроводникового материаловедения. Одним

из наиболее интересных эффектов, наблюдаемых в эпитаксиальных слоях $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, является анизотропия их магнитных и магнитотранспортных характеристик. Несмотря на то, что исследованию анизотропии в $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ посвящено значительное количество оригинальных экспериментальных работ и обзоров, в большинстве из них исследуется анизотропия свойств $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, находящегося в состоянии ферромагнитного упорядочения. Хотя природу возникновения эффектов анизотропии в $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ нельзя считать окончательно установленной, в работах [1-4] показано, что возникновение анизотропии магнитных и магнитотранспортных свойств $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ связано с возникновением в объеме эпитаксиального слоя пространственно-ориентированных структур. Наличие таких структур позволяет предположить, что эффекты анизотропии могут наблюдаться в $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ и за пределами состояния ферромагнитного упорядочения.

В данной работе приводятся результаты исследования анизотропии транспортных и магнитотранспортных характеристик эпитаксиальных слоев $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ при температурах, лежащих по обе стороны от температуры Кюри (T_C), при которой наблюдается переход $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ в состояние ферромагнитного упорядочения.

II. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Эпитаксиальные слои $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, исследуемые в данной работе, были получены при помощи метода НТ МЛЭ на полуизолирующей подложке GaAs с кристаллографической ориентацией (001). Перед выращиванием эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ на подложке GaAs при температуре 620°C выращивался буферный слой GaAs. После этого температура подложки опускалась до 275°C, и начиналось выращивание основного эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$. Температура эффузионной ячейки Mn в процессе выращивания составляла 860°C. Концентрацию примеси Mn в исследуемых образцах определяли с помощью электронно-зондового микроанализа, которая составила 0.78 ат.%, что соответствует значению x=0.0156. Толщина исследуемых образцов составляла 300 нм. В целом технология получения эпитаксиальных слоев соответствовала описанной в [5].

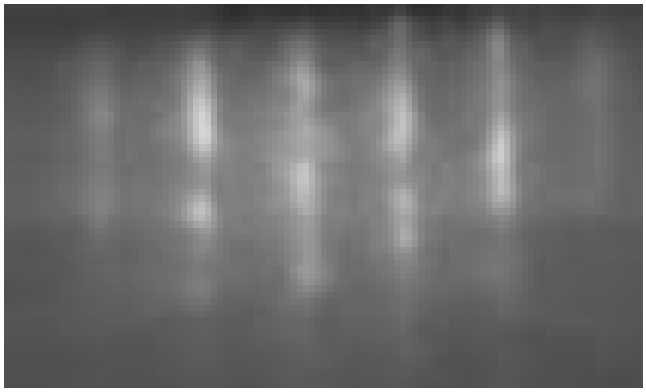


Рисунок 1. Дифракционная картина, полученная в процессе роста эпитаксиальной пленки $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ методом ОБЭ.

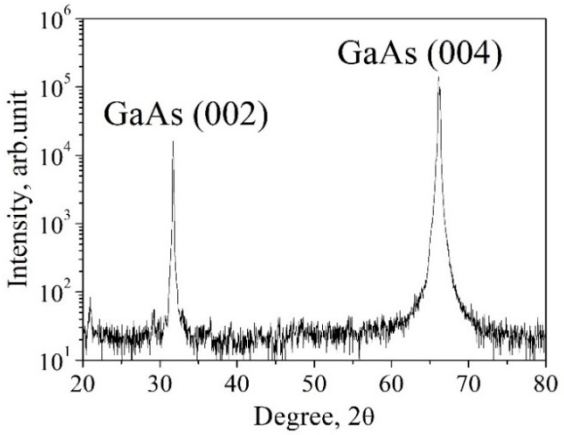


Рисунок 2. Рентгенограмма исследуемых слоев $Ga_{(1-x)}$ Mn_xAs.

Однородность эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ в процессе его роста контролировали с помощью метода дифракции отраженных быстрых электронов. Полученные дифрактограммы показаны на рис. 1, они представляют собой систему полосовых рефлексов, что, согласно [6, 7], свидетельствует о структурной однородности растущего эпитаксиального слоя. Исследования, проведённые с помощью рентгеноструктурного анализа, показали, что в спектрах исследованных образцов наблюдаются только рефлексы, соответствующие отражениям от атомных плоскостей GaAs (002) и GaAs (004) (рис. 2).Таким образом, данные рентгеноструктурного анализа также свидетельствуют, что образцы являются однородными и не содержат включений других фаз.

Измерения транспортных и магнитотранспортных свойств исследуемых эпитаксиальных слоев проводили четырёхзондовым методом в

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

геометрии Ван-дер Пау, что позволило проводить измерения сопротивления, магнетосопротивления и эффекта Холла в едином измерительном цикле. Измерения магнетосопротивления и эффекта Холла проводили при ориентации магнитного поля перпендикулярно к поверхности образца.

Концентрация основных носителей заряда в исследуемых эпитаксиальных слоях, определённая при температуре 300 К из измерений эффекта Холла, составила 7×10^{18}. Значение температуры Кюри (T_C) исследуемых слоев определяли согласно [8] из измерений аномального эффекта Холла, которое составило 50 К [9].

III. Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены данные измерения температурной зависимости удельного сопротивления исследуемых образцов, измеренные вдоль кристаллических осей [110] и [1$\bar{1}$0].

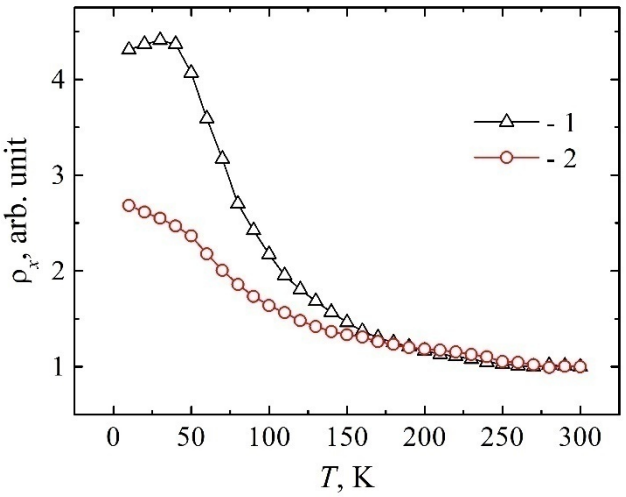


Рисунок 3. Температурная зависимость удельного сопротивления, измеренная вдоль осей [1$\bar{1}$0] (кривая 1) и [110] (кривая 2).

Чтобы исключить влияние размерных эффектов, связанных с различием расстояния между контактами, результаты измерения представлены в виде величины $\rho_x(T)$, определяемой как

$$\rho_x(T) = R(T)/R(300), \qquad (1)$$

где $R(300)$ – это сопротивление, определённое при 300 К.

Из представленных зависимостей видно, что при температурах ниже 150 К в характере температурных зависимостей величины ρ_x наблюдаются как количественные, так и качественные различия. Так, в интервале температур 20–150 К, сопротивление, измеренное вдоль оси [110], с понижением температуры увеличивается значительно быстрее, чем сопротивление, измеренное вдоль оси [1$\bar{1}$0]. Кроме того, при температурах, близких к T_C, на зависимости $\rho_x(T)$, определённой вдоль оси [110], присутствует локальный максимум, тогда как на зависимости $\rho_x(T)$, определённой вдоль оси [1$\bar{1}$0], при тех же температурах наблюдается лишь перегиб, сопровождающийся замедлением роста сопротивления с понижением температуры. Таким образом, на температурных зависимостях $\rho_x(T)$, определённых для кристаллических осей [110] и [1$\bar{1}$0] можно выделить две области – область количественных различий, наблюдающаяся в интервале температур от T_C до 150 К и область качественных различий, наблюдаемая в интервале температур от 20 К до T_C.

Рассмотрим возможные механизмы возникновения наблюдаемой нами анизотропии зависимости $\rho_x(T)$. На наш взгляд, анизотропия величины $\rho_x(T)$, наблюдаемая в интервале температур от 20 К до T_C, может быть связана с анизотропией магнитных свойств твердого раствора $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, находящегося в состоянии ферромагнитного упорядочения. Возникновение спонтанной намагниченности в $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ может приводить к возникновению магнетосопротивления, величина и знак которого зависят от угла между направлением вектора спонтанной намагниченности и направлением протекания электрического тока. Согласно литературным данным [3, 10], ось легчайшего намагничивания, следовательно, и вектор спонтанной намагниченности, в эпитаксиальных слоях $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, выращенных на подложках GaAs, лежит в плоскости эпитаксиального слоя. Поэтому в состоянии ферромагнитного упорядочения вектор намагниченности образца может находиться под различными углами к осям [110] и [1$\bar{1}$0]. Отметим, что величина этого угла может изменяться с температурой и зависит от соотношения эффектов, связанных с одноосной и двуосной анизотропией в эпитаксиальных слоях $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$.

Таким образом, токи, протекающие вдоль кристаллографических направлений [110] и [1$\bar{1}$0], могут быть различным образом ориентированы по отношению к вектору спонтанной намагниченности, что может определять различный характер температурной зависимости $\rho_x(T)$ при температурах ниже T_C.

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

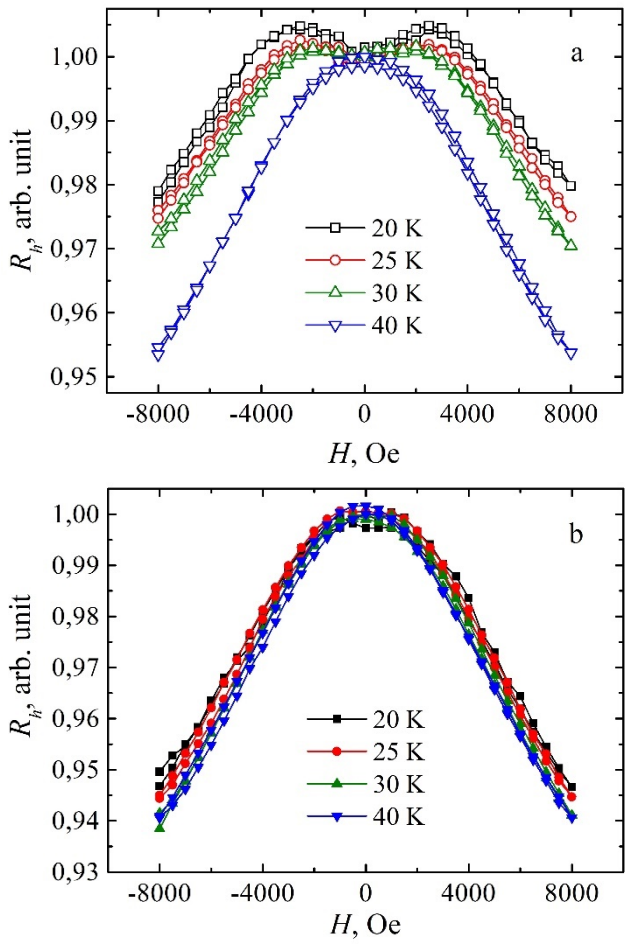


Рисунок 4. Магнетосопротивление исследуемых слоев $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, находящихся в состоянии ферромагнитного упорядочения: *a* – определённое вдоль оси $[1\bar{1}0]$, *b* – определённое вдоль оси [110].

О наличии анизотропии магнитных свойств исследуемых эпитаксиальных слоев, находящихся в состоянии ферромагнитного упорядочения, свидетельствуют приведенные на рис. 4 результаты измерения магнетосопротивления, проведенные вдоль кристаллографических осей [110] и $[1\bar{1}0]$. Для удобства представления величина магнетосопротивления характеризовалась величиной R_h, определяемой как

$$R_h = R(H) / R(0), \qquad (2)$$

где $R(0)$ – значение сопротивления, определённое при нулевой напряженности магнитного поля, а $R(H)$ – значение сопротивления, определённое при значении магнитного поля равном H. В таком представлении положительному магнетосопротивлению соответствует величина $R_h > 1$, а отрицательному величина $R_h < 1$.

Из представленных зависимостей видно, что магнетосопротивление исследуемых эпитаксиальных слоев существенным образом зависит от кристаллографического направления. Так для направления $[1\bar{1}0]$ в области полей до 2000 Эрстед наблюдается положительное магнетосопротивление, тогда как для направления [110] положительное магнетосопротивление отсутствует, однако в области полей до 2000 Э наблюдается плато величины R_h. Эти результаты подтверждают сделанное ранее предположение о том, что анизотропия величины $\rho_x(T)$ эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ при температурах ниже T_C, может быть связана с анизотропией его магнитных свойств.

Однако при температурах выше T_C, когда исследуемые эпитаксиальные слои находятся в парамагнитном состоянии, различия в виде зависимостей $\rho_x(T)$, определённых вдоль различных кристаллических осей, не могут быть объяснены анизотропией магнитных свойств твердых растворов $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$. На наш взгляд, наблюдаемый в интервале температур 50–150 К эффект анизотропии температурной зависимости удельного сопротивления исследуемых эпитаксиальных слоев может быть связан с наличием в их объеме ранее упомянутых пространственно-ориентированных структур. Природа формирования таких структур остается к настоящему времени окончательно не установленной, но можно предположить, что они обусловлены наличием преференциальных направлений встраивания примеси Mn в матрицу GaAs в процессе роста эпитаксиального слоя [1]. При этом может возникать неоднородность распределения примеси Mn вдоль различных кристаллографических направлений (даже таких, которые для кристаллического GaAs являются эквивалентными).

В случае наличия неоднородного распределения примеси Mn вдоль кристаллических осей [110] и $[1\bar{1}0]$ обнаруженные различия в температурных зависимостях $\rho_x(T)$, определённых вдоль этих кристаллических осей, на наш взгляд, могут быть связаны с анизотропией температурной зависимости подвижности носителей заряда μ. Известно, что температурная зависимость подвижности носителей заряда в сильнолегированных полупроводниках определяется процессами рассеяния носителей заряда на колебаниях кристаллической решетки (фононах) и ионизированных примесях [11, 12]. При рассеянии на фононах

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

температурная зависимость μ может быть описана формулой

$$\mu(T) = AT^{p}, \quad (3)$$

где A – коэффициент, не зависящий от температуры, p – показатель степени, равный (–1/2) или (–3/2) в зависимости от доминирующего механизма фононного рассеяния. Рассеяние на ионизированной примеси описывается формулой Брукса-Хердинга [11], которая может быть записана как

$$\mu(T) = \frac{BT^{3/2}}{N_t \ln(CT)}. \quad (4)$$

Здесь B и C – постоянные коэффициенты, N_t – концентрация рассеивающих центров. Из формулы (4) следует, что интенсивность процессов рассеяния и вид зависимости $\mu(T)$ зависит от среднего расстояния между рассеивающими центрами, в качестве которых в исследуемых образцах выступают атомы Mn в подрешетке Ga.

Процессы фононного рассеяния преобладают при более высоких температурах, тогда как рассеяние на ионизированных примесях становится доминирующим в области низких температур [12, 13]. Так, в GaAs, сильно легированного висмутом, рассеяние дырок на ионизированных примесях становится доминирующим при температурах ниже (80–120) К в зависимости от уровня легирования [14].

Исходя из сказанного, можно предположить, что в исследуемых слоях $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ при температурах выше 150 К доминируют процессы фононного рассеяния, при которых неоднородность распределения примеси не сказывается на характере рассеяния носителей заряда и рассеяние носителей заряда является изотропным. Поэтому в этой области подвижность, измеренная вдоль эквивалентных кристаллических направлений, при изменении температуры будет меняться одинаковым образом. При температурах ниже 150 К вклад рассеяния на ионизированных примесях в зависимость $\mu(T)$ становится доминирующим, поэтому неоднородность распределения примеси вдоль различных кристаллических осей может приводить к анизотропии процессов рассеяния носителей заряда и, как следствие, к наблюдаемым различиям в характере температурной зависимости их подвижности вдоль различных кристаллографических направлений. Тот факт, что зависимость $\rho_x(T)$ вдоль оси [110] выражена сильнее, чем вдоль оси $[1\bar{1}0]$ с учетом выше сказанного может свидетельствовать о том, что данное направление является преференциальным при встраивании атомов Mn в полупроводниковую матрицу растущего эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$.

IV. Заключение

Таким образом, проведенные нами исследования показали наличие анизотропии электрофизических свойств слоев $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, полученных методом НТ МЛЭ, проявляющейся в различии температурной зависимости удельного сопротивления, измеренного вдоль кристаллографических направлений [110] и $[1\bar{1}0]$. При этом характер наблюдаемых эффектов различен при температурах больших и меньших T_C. При температурах меньших T_C анизотропия различий в виде зависимости $\rho_x(T)$ связана, по-видимому, с анизотропией магнитных свойств $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$, находящегося в состоянии ферромагнитного упорядочения, тогда как при температурах больших T_C, различия в виде зависимости $\rho_x(T)$ определяются анизотропией зависимости $\mu(T)$, которая появляется вследствие возникновения в объеме растущего эпитаксиального слоя $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ пространственно-ориентированных структур, связанных с неоднородностью распределения примеси Mn вдоль различных кристаллических направлений.

Метаданные

Anisotropy of transport and magnetotransport properties of GaMnAs epitaxial layers obtained by low-temperature molecular beam epitaxy

P.B. Parchinskiy[1], A.A. Nasirov[1], A.S. Gazizulina[1], A. Arslanov[1], Dojin Kim[2], O.M. Tursunkulov[3]

[1] National University of Uzbekistan, Universitetskaya 4, 100176, Tashkent, Uzbekistan
[2] Chungnam National University, Yuseong-ku, 305-764, Taejon, Korea
[3] Center of Advanced Technologies, Universitetskaya st. 7, 100174, Tashkent, Uzbekistan

The temperature dependence of a resistance in solid solution $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ with the x=0.0156 have been presented. It was established that the temperature dependence of the resistance measured along the crystal axes [110] and $[1\bar{1}0]$ in the temperature range below 150 K are significantly different. It was shown that at the temperatures below the Curie temperature observed difference can be associated with the anisotropy of the magnetic properties of the $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ epitaxial layer, whereas at temperatures above the Curie temperature it may be related to the anisotropy of the mobility of charge carriers that occurs due to

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

the presence of spatially oriented structures in the volume of the epitaxial layer.

Keywords: molecular beam epitaxy, GaMnAs, magnetoresistance, ferromagnetic state, anisotropy.

Литература (References)

[1] U. Welp, V.K. Vlasko-Vlasov, A. Menzel, H.D. You, X. Liu, J.K. Furdyna, T. Wojtowicz. Appl. Phys. Lett. **85**, 260 (2004).
[2] S. Piano, X. Marti, A. W. Rushforth, K. W. Edmonds, R.P. Campion, M. Wang, O. Caha, T.U. Schülli, V. Holý, B.L. Gallagher. Appl. Phys. Lett. **98**, 152503 (2011).
[3] U. Welp, V.K. Vlasko-Vlasov, X. Liu, J.K. Furdyna, T. Wojtowicz. Phys. Rev. Lett., **90**, 167206 (2003).
[4] A.S. Gazizulina, A.A. Nasirov, A.A. Nebesniy, P.B. Parchinskiy, Dojin Kim. Fizika i tehnika poluprovodnikov **55**, №2, 159 (2021).
[5] I.T. Yoon, T.W. Kang, K.H. Kim and D.J. Kim, J. Appl. Phys. **95**, 3607 (2004).
[6] T. Hayashi, M. Tanaka, T. Nishinaga, H. Shimada, H. Tsuchiya, Y. Otuka. J. Cryst. Growth **175-176**, 1063 (1997).
[7] M. Tanaka. J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 2267 (1998).
[8] K.W. Edmonds, K.Y. Wang, R.P. Campion, A.C. Neumann, C.T. Foxon, B.L. Gallagher, P.C. Main, Appl. Phys. Lett. **81**, № 16, 3010-3012 (2002).
[9] B. Parchinskiy, A.S. Galashina, D. Kim. Uzbekskiy fizicheskiy zhurnal **19**(3), 143 (2017).
[10] H. Ohno. Physica E **6**, 702 (2000).
[11] V.L. Bonch-Bruevich, S.G. Kalashnikov. Fizika poluprovodnikov (Nauka, Moskva, 1990).
[12] Dzh. Bleykmor. Fizika tverdogo tela (Mir, Moskva, 1988).
[13] P.S. Kireev. Fizika poluprovodnikov (Vysshaya Shkola, Moskva, 1975).
[14] D.A. Beaton, R.B. Lewis, M. Masnadi-Shirazi, T. Tiedje, J. Appl. Phys. **108**, 083708 (2010).

Паст ҳароратли молекуляр эпитаксия орқали олинган GaMnAs эпитаксиал қатламларининг транспорт ва магнетотранспорт хусусиятларинг анизотропияси

П.Б. Парчинский[1], А.А. Насиров[1], А.С. Газизулина[1], А. Арсланов[1], Dojin Kim[2], О.М. Турсункулов[3]

[1] Ўзбекистон Миллий университети, Университет кўч. 4, 100176, Тошкент, Ўзбекистон
[2] Chungnam National University, Yuseong-ku, 305-764, Taejon, Korea
[3] Илғор технологиялар маркази, Университет кўч. 7, 100174, Тошкент, Ўзбекистон

Ушбу мақолада x=0.0156 қийматига ега бўлган $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ қаттиқ эритмаларининг қаршилигини температурага боғлиқлигининг ўлчаш натижалари келтирилган. 150 К дан паст температуралар оралиғида [110] ва [$1\bar{1}0$] кристаллографик ўқлар бўйлаб ўлчанган қаршиликнинг температурага боғланиши турлича бўлиши кузатилган. Кюри температурасидан паст ҳароратларда, бу фарқлар $Ga_{(1-x)}Mn_xAs$ эпитаксиал қатлам магнит хусусиятларининг анизотропияси билан боғлиқ бўлиши мумкин. Кюри температурасидан юқори ҳароратларда кузатилган фарқ епитаксиал қатламнинг йўналишлар бўйича структуранинг бир хил бўлмаслиги ҳисобига келиб чиқадиган заряд ташувчилар ҳаракатчанлигининг анизотропияси билан боғлиқ бўлиши мумкин.

Калит сўзлар: молекуляр эпитаксия, GaMnAs, магнит қаршилик, ферромагнит ҳолат, анизотропия.

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.