

15

## Использование эффекта отрицательного магнитосопротивления в кремнии для создания многофункциональных датчиков

© М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, Г.Х. Мавлонов, Ш.Н. Ибодуллаев<sup>¶</sup>, С.А. Тачилин

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

<sup>¶</sup> E-mail: shakhboz.ibodullayev.92@inbox.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 14 июня 2021 г.

Принято к публикации 17 июня 2021 г.

Установлено, что особенностью отрицательного магнитосопротивления в кремнии, содержащем нанокластеры атомов марганца, является его высокая чувствительность к различным внешним воздействиям. Определены закономерности изменения отрицательного магнитосопротивления в кремнии, содержащем нанокластеры атомов марганца, в зависимости от температуры, освещенности, величины электрического и магнитного полей. Показана возможность создания нового класса многофункциональных датчиков физических величин на основе единого кристалла кремния, содержащего нанокластеры атомов марганца.

**Ключевые слова:** многофункциональный датчик, отрицательное магнитосопротивление, кремний, нанокластер, марганец.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51504.18799

В настоящее время датчики для контроля и измерения физических величин широко применяются в различных областях науки и техники [1]. Для контроля и измерения температуры, освещенности, давления, магнитного и электрического полей используются отдельные датчики, изготовленные на основе разных полупроводниковых материалов [2]. При использовании различных датчиков в одной системе (медицина, роботы, системы автоматизации и т.д.) для их нормального функционирования необходимо решить ряд технических проблем, связанных со взаимным согласованием работы нескольких датчиков, расположением их в системе, обеспечением необходимой энергией, а также другими факторами. Также следует отметить, что использование достаточно большого числа датчиков различного назначения приводит к увеличению габаритов и массы приборов и устройств. Поэтому определенный научный и практический интерес представляют разработка и создание многофункциональных датчиков для измерения и контроля различных физических величин (температура, освещение, давление, магнитное поле). В этом плане интересны работы [3,4], в которых авторы показали возможность создания многофункциональных датчиков на основе гибридных микросборок. Нам кажется, что это требует не только достаточно сложных схемотехнических, но и трудоемких технологических решений и операций.

Целью настоящей работы является использование особенностей магнитных свойств кремния, легированного марганцем, т.е. отрицательного магнитосопротивления (ОМС), для создания многофункциональных датчиков физических величин. Как было показано ранее [5–7], при определенных термодинамических условиях легирования в кристаллической решетке кремния формируются магнитные нанокластеры, состоящие из четырех ионов

марганца ( $Mn^{++} - 4s^23d^5$ ), находящихся в ближайших междоузельных состояниях вокруг иона бора ( $B^-$ ), их наличие стимулирует появление аномально высокого отрицательного магнитосопротивления при  $T = 300$  К [8], которое практически отсутствует во многих других магнитных полупроводниковых материалах.

В настоящее время нами показана возможность использования особенностей эффекта ОМС в кремнии для создания нового класса многофункциональных датчиков на основе единого кристалла. В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний  $p$ -типа проводимости с  $\rho = 3 \Omega \cdot cm$  (КДБ-3) размером  $8 \times 3 \times 0.6$  mm. Согласно работе [9], условия легирования образцов были такими, что после диффузии марганца образцы оставались  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = (5-8) \cdot 10^3 \Omega \cdot cm$  при  $T = 300$  К. После диффузии образцы подвергались механической и химической обработке для удаления с поверхности образца различных дефектов и слоя, обогащенного марганцем. Электрические параметры были исследованы методом эффекта Холла.

Было изучено влияние внешнего магнитного поля на электрофизические параметры кремния с нанокластерами атомов марганца, измерения проводились при комнатной температуре при поперечном ( $\mathbf{B} \perp \mathbf{I}$ ) направлении магнитного поля по отношению к электрическому току, протекающему через образец. Напряженность магнитного поля изменялась в интервале  $B = 0-1.8$  Т, т.е. выполнялось условие слабого магнитного поля. В отличие от других магнитных полупроводников в исследуемых образцах проводимость при наличии магнитного поля не уменьшается, а, наоборот, существенно увеличивается, т.е. при комнатной температуре наблюдается эффект аномально высокого ОМС. Такие эффекты в

Таблица 1. Электрические параметры исследуемых образцов при  $T = 300$  К

Номер образца	Удельное сопротивление $\rho$ , $\Omega \cdot \text{cm}$	Концентрация носителей заряда $p, n$ , $\text{cm}^{-3}$	Подвижность носителей заряда $\mu$ , $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	Магнитосопротивление $\Delta\rho/\rho_0$ , % (при 100 V/cm)
1	$5.0 \cdot 10^3$	$1.30 \cdot 10^{13}$	70	-350
2	$6.3 \cdot 10^3$	$1.80 \cdot 10^{13}$	55	-220
3	$5.8 \cdot 10^4$	$1.60 \cdot 10^{12}$	64	-64
4	$2.0 \cdot 10^5$	$1.40 \cdot 10^{11}$	184	-10
5	$2.5 \cdot 10^5$	$2.55 \cdot 10^{10}$	980	6

других полупроводниках наблюдались при более низких температурах ( $T < 100$  К), а значение установленного ОМС достигало величины  $\Delta\rho/\rho_0 \sim 4\text{--}5\%$  [10].

В табл. 1 приведены электрические параметры полученных образцов, а также их максимальное значение ОМС при  $T = 300$  К. Видно, что в таких образцах наблюдаются низкое значение подвижности и аномально большие значения ОМС, что подтверждают результаты работы [11]. Установлено, что действительно во всех компенсированных образцах, легированных марганцем, с удельным сопротивлением  $\rho = (5\text{--}8) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  наблюдается аномально большое ОМС при  $T = 300$  К. С ростом удельного сопротивления  $\rho > 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  значение ОМС уменьшается, а в перекомпенсированных образцах  $n$ -типа проводимости независимо от их удельного сопротивления наблюдается только небольшое положительное магнитосопротивление. Поэтому в дальнейших исследованиях были использованы только образцы  $p$ -типа проводимости с  $\rho = (5\text{--}8) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ . При исследовании было обнаружено, что значение ОМС в полученном материале существенно зависит от температуры, освещенности (как фонового света, так и ИК-излучения) и электрического поля при наличии постоянного магнитного поля. Именно этот интересный эффект стимулировал создание многофункционального датчика.

На рис. 1 представлены зависимости значения ОМС полученных образцов от величины магнитного поля в интервале  $B = 0.05\text{--}1.8$  Т при  $T = 300$  К. Видно, что с ростом магнитного поля значение ОМС монотонно увеличивается и достигает максимального значения  $\Delta\rho/\rho_0 = 220\text{--}300\%$ . В исследуемой области магнитного поля магниточувствительность при  $T = 300$  К составляет более  $\alpha = 100\%/T$ . Это довольно высокая магниточувствительность для полупроводникового материала при  $T = 300$  К, что показывает возможность создания магнитодатчиков на основе полученного материала.

На рис. 2, а представлена температурная зависимость ОМС исследуемых образцов в интервале температур  $T = 240\text{--}300$  К в отсутствие освещения при постоянном значении электрического и магнитного полей. Как видно, с понижением температуры значение ОМС почти монотонно увеличивается и при  $T = 240$  К составляет  $\Delta\rho/\rho_0 \sim 600\%$ . Расчет показывает, что температурная

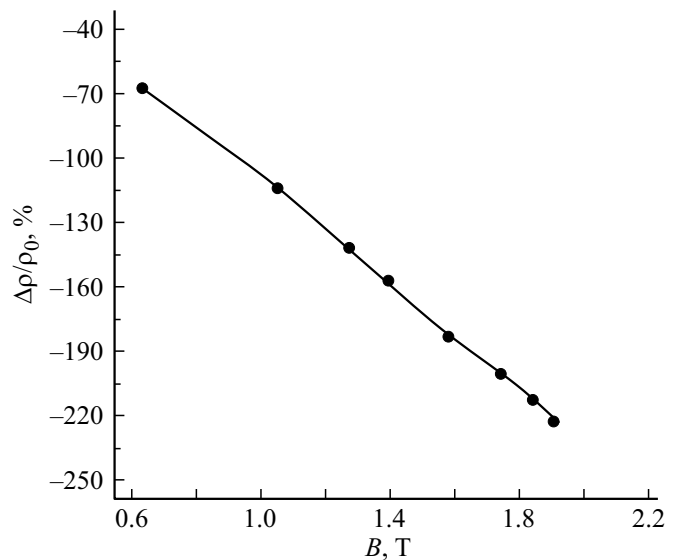
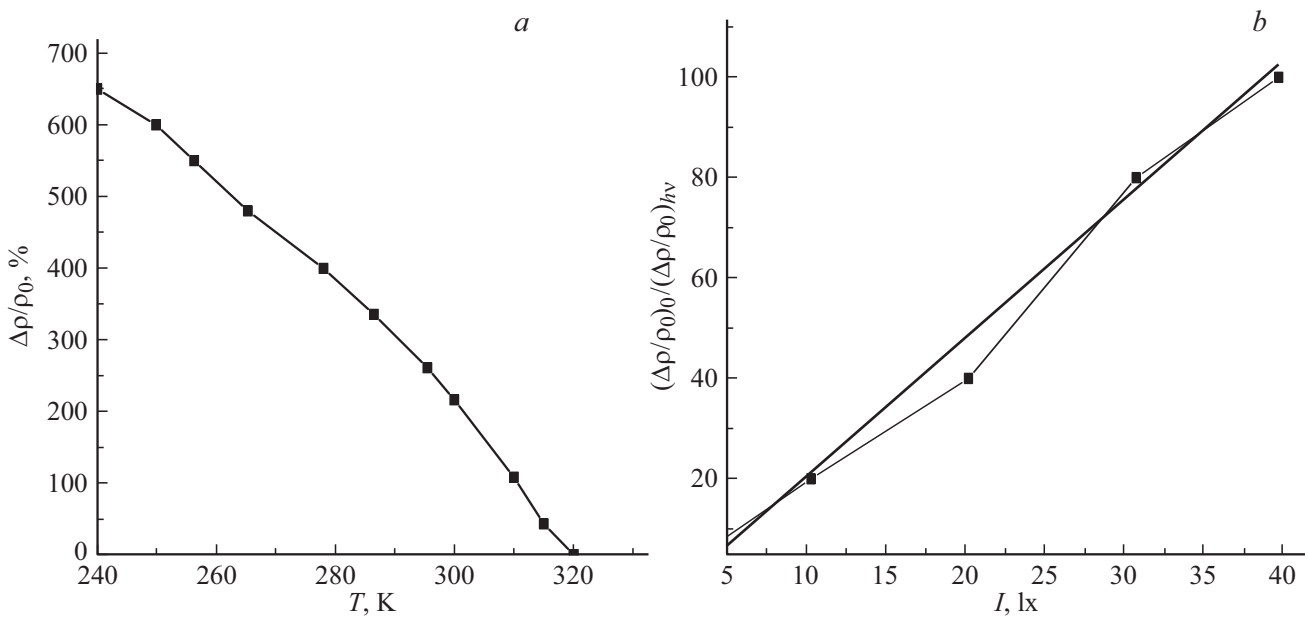


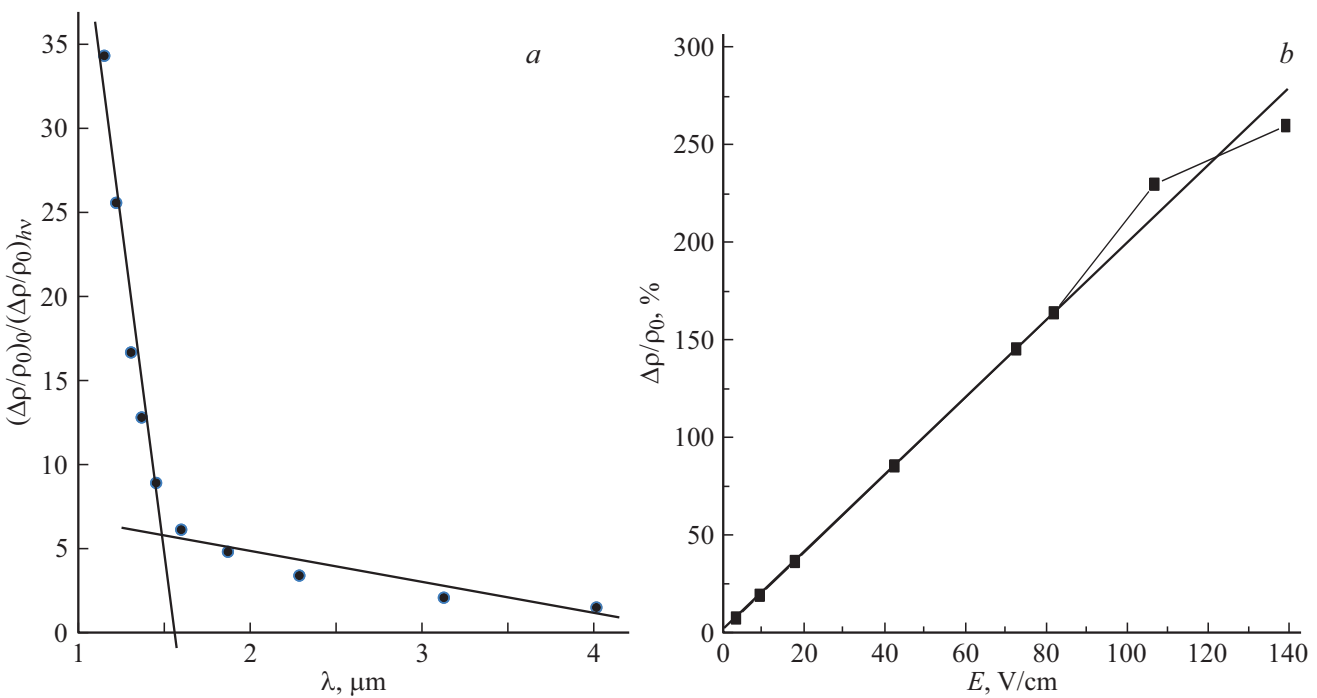
Рис. 1. Зависимость ОМС от магнитного поля.

чувствительность ОМС в образцах в исследуемом интервале температур составляет  $\beta = 7\text{--}8\%/K$ . Это означает, что можно создать достаточно высокочувствительный и быстродействующий термодатчик на основе изменения ОМС в  $\text{Si}(\text{Mn},\text{B})$ .

Исследование влияния достаточно низкого уровня освещения светом спектра видимого диапазона на значение ОМС при  $T = 300$  К показало, что освещение образцов приводит к уменьшению ОМС. На рис. 2, б представлена зависимость ОМС от интенсивности освещения лампой накаливания в интервале  $I = 5\text{--}40$  lx. Измерения проводились при наличии фоновой освещенности, не устраняемой слабой постоянной засветки образцов ИК-светом малой интенсивности, источником которой являются различные внешние нагретые объекты. Видно, что освещение образцов приводит к существенному изменению ОМС. Расчет показал, что чувствительность  $\Delta\rho/\rho_0$  при этом составляет  $\gamma = 2\text{--}2.5\%/lx$ . Полученные результаты показывают, что на основе ОМС в  $\text{Si}(\text{Mn},\text{B})$  можно создать достаточно чувствительный фотодатчик, работающий при низкой интенсивности света при  $T = 300$  К.



**Рис. 2.** *a* — зависимость ОМС от температуры; *b* — зависимость ОМС от интенсивности света видимого диапазона  $(\Delta\rho/\rho_0)_{hv}$  относительно темнового значения  $(\Delta\rho/\rho_0)_0$ .



**Рис. 3.** *a* — спектральная ИК-зависимость ОМС  $(\Delta\rho/\rho_0)_{hv}$  относительно темнового значения  $(\Delta\rho/\rho_0)_0$ ; *b* — зависимость ОМС от электрического поля.

На рис. 3, *a* представлено относительное изменение ОМС при попадании ИК-света в интервале  $\lambda = 1.2\text{--}4\ \mu\text{m}$ , а именно спектральная ИК-зависимость ОМС  $(\Delta\rho/\rho_0)_{hv}$  относительно темнового значения  $(\Delta\rho/\rho_0)_0$ . Как видно, в области ИК-спектра с  $\lambda = 1.2\text{--}4\ \mu\text{m}$  с увеличением энергии фотонов падающего ИК-излучения значение ОМС существенно

уменьшается (почти в 30–35 раз) с чувствительностью  $\beta = 10\text{--}15\%/ \mu\text{m}$  при мощности ИК-света  $P = 10^{-6}\ \text{W}$  и  $T = 300\ \text{K}$ . В интервалах  $\lambda = 1.2\text{--}1.5$  и  $1.5\text{--}4\ \mu\text{m}$  магнитосопротивление уменьшается с различной закономерностью. Установлено, что при уменьшении мощности ИК-излучения до  $P = 10^{-9}\ \text{W}$  характер изменения ОМС остается таким же, как и при  $P = 10^{-6}\ \text{W}$ . Эти

**Таблица 2.** Основные параметры разработанного multifunctional датчика на основе отрицательного магнитосопротивления в кремнии, легированном марганцем, при  $T = 300$  К

Параметр	Внешнее воздействие				
	Магнитное поле $B = 0.05-1.8$ Т	Температура $T = 240-320$ К	Свет спектра видимого диапазона с интен- сивностью $I = 5-40$ lx	ИК-излучение ( $\lambda = 1.2-4 \mu\text{m}$ ) мощностью $P = 10^{-6}$ W	Электрическое поле $5-140$ V/cm
Чувствительность $\Delta\rho/\rho_0$	95–107%/Т	7–8%/К	2–2.5%/lx	10–15%/μm	2–2.5%/(V/cm)
Быстродействие, ms	20–25	25–30	10–15	15–20	10–15

данные позволяют использовать ОМС в кремнии, легированном марганцем, для создания достаточно чувствительных ИК-датчиков в интервале  $\lambda = 1.2-4 \mu\text{m}$ .

Экспериментально установлено, что значение ОМС существенно увеличивается с ростом приложенного электрического поля в отсутствие любого типа освещения при  $T = 300$  К. Данная экспериментальная зависимость, усредненная прямой линией, представлена на рис. 3, *b*. Как видно из этого рисунка, с ростом значения электрического поля значение ОМС практически монотонно увеличивается. На основе полученных результатов установлено, что чувствительность ОМС к электрическому полю составляет 2–2.5%/(V/cm).

Таким образом, на основе экспериментальных данных было установлено, что в кремнии с магнитными нанокластерами *p*-типа с  $\rho = (5-8) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  при комнатной температуре наблюдается аномально большое значение ОМС, которое отсутствует в других магнитных полупроводниковых материалах [12–14]. Особенность наблюдаемого ОМС в полученных образцах заключается в том, что значение ОМС существенно зависит не только от магнитного поля, но и от температуры, интенсивности освещения ИК-излучения в области  $\lambda = 1.2-4 \mu\text{m}$ , а также электрического поля. Определено, что чувствительность ОМС к различным внешним воздействиям составляет 7–8%/К для температуры, 2–2.5%/(V/cm) для электрического поля и 95–107%/Т для магнитного поля, 2–2.5%/lx для интенсивности освещения светом спектра видимого диапазона и 10–15%/μm для ИК-излучения в области  $\lambda = 1.2-4 \mu\text{m}$ . В табл. 2 представлены основные параметры изготовленных датчиков при наличии внешних воздействий ( $T = 300$  К). Такой интересный эффект наблюдался во всех образцах Si(Mn,B) с  $\rho = (5-8) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  независимо от их размеров. Данный эффект позволяет создать новый класс multifunctional датчиков на основе единого кристалла кремния с нанокластерами атомов марганца, работающих в интервале температур  $T = 240-320$  К, с довольно высокой чувствительностью.

### Финансирование работы

Работа выполнена в 2017–2020 гг. в рамках проекта ОТ-Ф2-55 „Разработка научных основ получения объем-

наноструктурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков, *Датчики. Справочное пособие* (Техносфера, М., 2012).
- [2] Б. Топильский, *Микроэлектронные измерительные преобразователи* (БИНОМ. Лаборатория знаний, М., 2013).
- [3] Е.А. Ломтев, П.Г. Михайлов, А.У. Аналиева, А.О. Сазонов, *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, **2** (12), 57 (2015).
- [4] А.А. Дружинин, А.П. Кутраков, Н.С. Лях-Кагуй, А.М. Вуйчик, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 4, 23 (2013).
- [5] S.K. Vux, R.G. Blair, P.K. Gogna, H. Lee, G. Chen, M.S. Dresselhaus, R.B. Kaner, J.P. Fleurial, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 2445 (2009). DOI: 10.1002/ADFM.200900250
- [6] В.И. Фистуль, В.М. Казакова, Ю.А. Бобриков, А.В. Рябцев, К.П. Абдурахманов, С. Зайнабидинов, Т.С. Камиллов, Ш.Б. Утамурадова, *ФТП*, **16** (5), 939 (1982).
- [7] G.W. Ludwig, N.H. Woodbury, R.O. Carlson, *J. Phys. Chem. Solids*, **8**, 490 (1959).
- [8] М.К. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов, *ФТП*, **44** (9), 1181 (2010). [M.K. Bakhadyrkhanov, K.S. Ayupov, G.Kh. Mavlyanov, S.B. Isamov, *Semiconductors*, **44** (9), 1145 (2010). DOI: 10.1134/S106378261009006X].
- [9] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, З.М. Сапарниязова, С.А. Тачилин, *Неорганические материалы*, **47** (5), 545 (2011). [M.K. Bakhadyrkhanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, Kh.M. Iliev, K.S. Ayupov, Z.M. Saparniyazova, S.A. Tachilin, *Inorgan. Mater.*, **47** (5), 479 (2011). DOI: 10.1134/S0020168511050062].
- [10] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, О.Э. Саттаров, С.А. Тачилин, *ФТП*, **48** (8), 1014 (2014). [M.K. Bakhadyrkhanov, G.H. Mavlonov, X.M. Iliev, K.S. Ayupov, O.E. Sattarov, S.A. Tachilin, *Semiconductors*, **48** (8), 986 (2014). DOI: 10.1134/S106378261408003X].

- [11] М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, Г.Х. Мавлонов, К.С. Аюпов, С.Б. Исамов, С.А. Тачилин, *ЖТФ*, **89**(3), 421 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47179.184-18 [M.K. Bakhadyrkhanov, Kh.M. Iliiev, G.Kh. Mavlonov, K.S. Ayupov, S.B. Isamov, S.A. Tachilin, *Tech. Phys.*, **64**(3), 385 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219030046].
- [12] Л.И. Королёва, И.К. Баташев, А.С. Морозов, А.М. Балбашов, Н. Szymczak, *ЖТФ*, **88**(2), 228 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.02.45413.2358 [L.I. Koroleva, I.K. Batashev, A.S. Morozov, A.M. Balbashov, H. Szymczak, A. Slawska-Waniew, *Tech. Phys.*, **63**(2), 220 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218020202].
- [13] В.В. Устинов, А.Б. Ринкевич, Л.Н. Ромашев, Д.В. Перов, *ЖТФ*, **74**(5), 94 (2004). [V.V. Ustinov, A.B. Rinkevich, L.N. Romashev, D.V. Perov, *Tech. Phys.*, **49**(5), 613 (2004). DOI: 10.1134/1.1758338].
- [14] А.С. Газизулина, А.А. Насиров, А.А. Небесный, П.Б. Парчинский, Dojin Kim, *ФТП*, **55**(2), 159 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.02.50503.9502 [A.S. Gazizulina, A.A. Nasirov, A.A. Nebesniy, P.B. Parchinskiy, Dojin Kim, *Semiconductors*, **55**(2), 214 (2021). DOI: 10.1134/S1063782621020123].