

4. Nader, R. Surface morphology of Ge-modified 3C-SiC/Si films / R. Nader, M. Kazan, E. Moussaed, T. Stauden [et al.] // Surf. Interface Anal. – 2008. – V. 40. – P. 1310–1317.
5. Gaiduk, P.I. Nanovoids in MBE-grown SiGe alloys implanted in situ with Ge<sup>+</sup> ions / P. I. Gaiduk, J. Lunds-gaard Hansen, A. Nylandsted Larsen, E. A. Steinman // Phys.Rev. B. – 2003. -V. 67. -№23. – P. 235310.
6. Gaiduk, P.I. Strain-driven defect evolution in Sn<sup>+</sup> implanted Si/SiGe multilayer structure / P.I. Gaiduk, A. Nylandsted Larsen, W. Wesch // Nucl.Instr. and Meth.in Phys. Res. B. – 2009. – V. 267. – 1239.
7. Сорокин, Л.М., Калмыков, А.Е., Бессолов, В.Н Структурная характеристика эпитаксиальных слоев GaN на кремнии: влияние буферных слоев / Л.М. Сорокин, А.Е. Калмыков, В.Н Бессолов, Н.А. Феоктистов, А.В. Осипов [и др.] // Письма в ЖТФ. - 2011. - Т. 37. - № 7. - С. 72–79.
8. Roy, S., Portail, M. Transmission electron microscopy investigation of microtwins and double positioning domains in (111) 3C-SiC in relation with the carbonization conditions / S. Roy, M. Portail, T. Chassagne, J.M. Chauveau, P. Vennéguès, M. Zielinski //Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 95. - № 8. – P. 081903.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКИХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗА: СИЛЬНАЯ ИЛИ СЛАБАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ?

**В. И. Головчук<sup>1</sup>, Ю. А. Бумай<sup>2</sup>, А. Д. Величка<sup>1</sup>, М. Г. Лукашевич<sup>1</sup>,  
Н. М. Лядов<sup>3</sup>, И. А. Файзрахманов<sup>3</sup>, Р. И. Хайбуллин<sup>3</sup>**

---

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, г. Минск, 220050, Беларусь, e-mail: Lukashevich@bsu.by*

<sup>2)</sup> *Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013, Беларусь, e-mail: yuabumai@bntu.by*

<sup>3)</sup> *Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского  
ФИЦ Казанский научный центр РАН, Сибирский тракт 10/7, 420029 Казань, Россия,  
e-mail: rik@kfti.knc.ru*

В работе представлены результаты экспериментального исследования и интерполяции температурных зависимостей сопротивления нанокристаллических пленок железа, полученных на кремниевых подложках методом ионно-ассистированного осаждения. Показано, что в низкотемпературном интервале ( $5\text{ K} < T < 35\text{ K}$ ) увеличение сопротивления при понижении температуры обусловлено размерно-зависимыми процессами слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия. Процессы электрон-электронного взаимодействия остаются трехмерными при понижении температуры, в то время как процессы слабой локализации показывают переход к двумерному транспорту при  $T \approx 20\text{ K}$ , обусловленный превышением характеристической длины слабой локализации толщины пленки.

**Ключевые слова:** пленка; железо; слабая локализация; сильная локализация; электронный транспорт.

## LOW-TEMPERATURE CONDUCTIVITY OF THIN NANOCRYSTALLINE IRON FILMS: STRONG OR WEAK LOCALIZATION?

V. I. Golovchuk<sup>1</sup>, Yu. A. Bumai<sup>2</sup>, M. G. Lukashevich<sup>1</sup>,  
N. M. Lyadov<sup>3</sup>, I. A. Faizrakhmanov<sup>3</sup>, R. I. Khaibullin<sup>3</sup>

---

<sup>1)</sup> Belarusian State University, Nezalezhnosti Ave., 4, Minsk-220050, Belarus

<sup>2)</sup> Belarusian National Technical University, 65, Independence Ave., Minsk-220013, Belarus

<sup>3)</sup> Kazan Institute of Physics and Technology. E.K. Zavoisky Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Siberian Trakt 10/7, 420029 Kazan, Russia

Corresponding author: M. G. Lukashevich (Lukashevich@bsu.by)

The paper presents the results of an experimental study and interpolation of the temperature dependences of the resistance of nanocrystalline iron films obtained on silicon substrates by ion-assisted deposition. It is shown that in the low-temperature range ( $5\text{ K} < T < 35\text{ K}$ ) the increase in resistance with decreasing temperature is due to size-dependent processes of weak localization and electron-electron interaction. The processes of electron-electron interaction have a three-dimensional character with decreasing temperature, while the processes of weak localization show a transition from a three-dimensional to a two-dimensional electronic transport at  $T \approx 20\text{ K}$ , due to the excess the weak localization characteristic length the film thickness.

**Key words:** film; iron; weak localization; strong localization; electronic transport.

### ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки и многослойные структуры с магнитным упорядочением, в которых можно реализовать процессы спин-зависимого рассеяния и туннелирования или прыжков носителей заряда, являются базовыми элементами спинтроники [1]. Для их получения наиболее широко используются такие материалы как железо, кобальт и никель. Получаемые различными технологическими методами пленки имеют разное структурное совершенство и могут находиться на металлической или диэлектрической сторонах перехода диэлектрик-металл, а их магнитное состояние и анизотропия может меняться в широких пределах. Спин-зависимый транспорт в таких системах зависит не только от их магнитного состояния, но и от режима локализации электронов (слабая или сильная), т.е. доминирующий механизм электронного транспорта может существенно определять спиновую составляющую процессов переноса. Поэтому установление механизма переноса электронов в таких средах представляется первым и наиболее важным шагом для прогнозирования знака, величины и вида магнитопольной зависимости спин-зависимых гальваномагнитных явлений. В данной работе представлены результаты измерения и установления режима переноса электронов, а также причины увеличения сопротивления нанокристаллических пленок железа на металлической стороне перехода диэлектрик-металл при понижении температуры в области низких температур. Такое увеличение может вызываться рядом причин: слабая [2] или сильная [3, 4] локализация носителей заряда с прыжковым [3, 4] или туннельным переносом [5–7], магнитный фазовый переход [8] или неоднородность магнитной среды [9].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тонкие (80 нм) нанокристаллические пленки железа были получены методом ионно-ассистированного осаждения на кремниевых подложках. Особенности технологии получения представлены в [10]. Омические контакты к пленкам изготавливались путем ультразвуковой пайки медных проволочек индиевым припоем. Температурная зависимость электросопротивления измерялась в температурном интервале  $T = 300\text{--}5$  К. Все измерения проводились на линейном участке вольтамперной характеристики в режиме стабилизации тока, протекающего в плоскости пленки. Анализ экспериментальных результатов проведен в рамках современных представлений о слабой и сильной локализации электронов, межкластерном туннелировании и формировании неоднородной магнитоупорядоченной среды.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные в синтезированных пленках температурная зависимость сопротивления и магниторезистивный эффект показали [11], что для них характерен перколяционный металлический режим переноса электронов до температур  $T \approx 40$  К. При более низких температурах знак температурного коэффициента сопротивления становится отрицательным, что может вызываться рядом вышеуказанных причин [2–9]. Синтезированные пленки представляют собой наноструктурированный материал, в котором нанокристаллиты  $\alpha$ -железа с диаметром порядка  $\approx 10$  нм, разделены неупорядоченными прослойками аморфной и оксидной фаз железа. В таких средах в первую очередь можно ожидать прыжкового или туннельного переноса электронов для которых характерно экспоненциальное увеличение сопротивления при понижении температуры  $R \propto \exp(T_0/T)^p$  с разными коэффициентами  $T_0$  и  $p$  [3–7].

На рис. 1 показаны низкотемпературные зависимости сопротивления в арениусовых координатах с разными коэффициентами  $p$ , которые характерны для прыжковых и туннельного механизмов проводимости. Как видно хорошей линейаризации экспериментальных кривых не наблюдается для всех возможных теоретических коэффициентов  $p = 1, 1/2, 1/3$  или  $1/4$ .

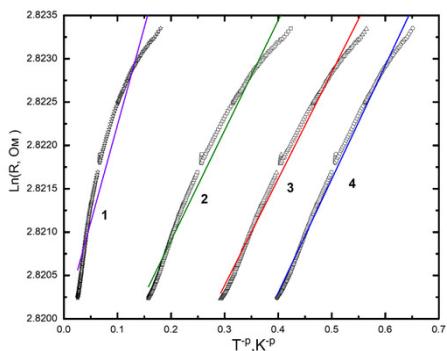
Другая модель флуктуационно-индуцированного туннелирования [7] также предсказывает экспоненциальную температурную зависимость сопротивления с  $p = 1$ , но уже с двумя коэффициентами  $T_0$  и  $T_1$  вида:  $R \propto \exp(T_0/T + T_1)$ . Проведенная интерполяция показала, что наилучшее совпадение с экспериментом, практически совпадает с кривой 1 на рис. 1 и достигается при значениях коэффициентов  $T_0 = 5,06$  и  $T_1 = 1,11$ . Таким образом, проведенная в рамках данной модели интерполяция позволяет утверждать, что исследуемые пленки железа находятся на металлической стороне перехода диэлектрик-металл.

Дополнительным подтверждением этого может служить показанная на рис. 2 температурная зависимость локальной энергии активации, положительный наклон которой свидетельствует о доминировании металлического механизма переноса электронов [12, 13].

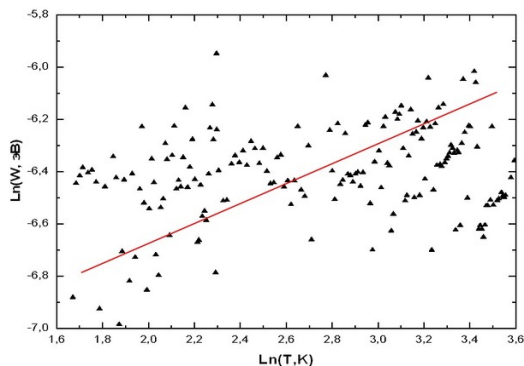
На металлической стороне перехода увеличение сопротивления пленки при понижении температуры может вызываться ее слабой разупорядоченностью и, как следствие, наличием в ней размерно-зависимых процессов квантовой интерференции электронных волн, так называемых процессов слабой локализации, приводящих к

увеличению сопротивления при понижении температуры из-за квантовых поправок к проводимости [2].

На рис. 2 показаны экспериментальная температурная зависимость проводимости, нормированная на проводимость при  $T = 35$  К, (незаполненные круглые символы) и ее интерполяция в рамках квантовой теории проводимости:  $\sigma = \sigma_0 + AT^{1/2}$  (кривая 1) и  $\sigma = \sigma_0 + B \ln T$  (кривая 2), учитывающая процессы квантовой локализации и влияние на проводимость электрон-электронного взаимодействия, соответственно.



**Рисунок 1. Экспериментальные температурные зависимости сопротивления пленки железа (точки) и их интерполяция экспоненциальной зависимостью с разными коэффициентами  $p$ : 1 – 1; 2 – 1/2; 3 – 1/3; 4 – 1/4**

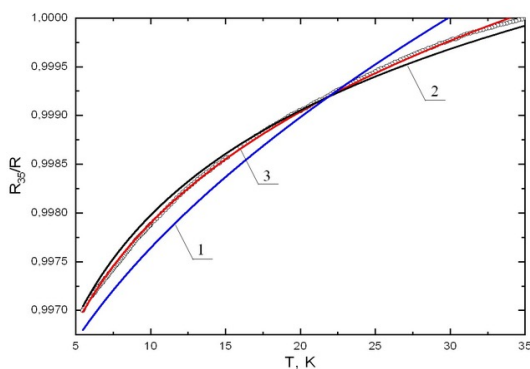


**Рисунок 2. Температурная зависимость локальной энергии активации**

Как видно, обе теоретические зависимости не дают хорошего согласия с результатами измерений. И только объединённая зависимость  $\sigma = \sigma_0 + AT^{1/2} + B \ln T$  (кривая 3), учитывающая аддитивный вклад как процессов слабой локализации, так и электрон-электронного взаимодействия, хорошо согласуется с экспериментом при значениях  $A = 2,5 \cdot 10^{-4}$  и  $B = 1,18 \cdot 10^{-3}$ , т.е. при доминировании логарифмического члена. Согласно теории, учитывающей квантовые поправки в проводимость, первая зависимость описывает трехмерные, а вторая - двумерные процессы слабой локализации [2].

На рис. 3 можно видеть также, что доминирование логарифмического члена наиболее хорошо согласуется с экспериментом при температурах меньше  $T \approx 20$  К. Следовательно эту температуру можно связать с переходом от трехмерных к двумерным процессам слабой локализации, в то время как процессы электрон-электронного взаимодействия остаются трехмерными в этом температурном диапазоне.

Высказанное ранее в [9] предположение, что низкотемпературное увеличение сопротивления в островковых пленках железа может быть обусловлено магнитной неоднородностью из-за замораживания направлений спинов на границах островков, в нашей работе не получило ни экспериментального, ни хорошо аргументированного теоретического доказательства. Вместе с тем следует отметить, что исследуемые пленки показывают инверсный гигантский магниторезистивный эффект [11], кото-



**Рисунок 3. Температурная зависимость проводимости, нормированная на проводимость при  $T = 35$  К, и ее интерполяция зависимостями:**

$$1 - \sigma = \sigma_0 + AT^{1/2}; 2 - \sigma = \sigma_0 + B \ln T;$$

$$3 - \sigma = \sigma_0 + AT^{1/2} + B \ln T;$$

$$(A = 2,64 \cdot 10^{-4}, B = 1,10 \cdot 10^{-3})$$

коэффициента сопротивления и к типичной для совершенных металлов независимости сопротивления от температуры в этом низкотемпературном интервале. Это экспериментальное наблюдение косвенно подтверждает именно слабую разупорядоченность в исходно синтезированной пленке и доминирование процессов слабой локализации на металлической стороне перехода диэлектрик-металл.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанокристаллические пленки железа, синтезированные на кремниевых подложках методом ионно-стимулированного осаждения, находятся на металлической стороне перехода диэлектрик-металл. Наблюдаемое экспериментально увеличение сопротивления с понижением температуры в интервале ( $5 \text{ К} < T < 35 \text{ К}$ ) обусловлено процессами слабой электронной локализации и электрон-электронным взаимодействием. Причем процессы электрон-электронного взаимодействия остаются трехмерными при понижении температуры, в то время как для процессов слабой локализации при  $T \approx 20 \text{ К}$  наблюдается переход от трехмерного к двумерному случаю из-за превышения характеристической длины сбоя фазы волновой функции над толщиной исследуемой пленки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Zutic, I. Spintronics: Fundamentals and application / Igor Zutic // Rev. Mod. Phys.–2004. – Vol. 76.– № 2.– P. 323-386.
2. Bergman, G. Weak localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol. 107, № 1. – P. 1 – 58.
3. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах/ Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1982. – 664 с.
4. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников/ Б. И. Шкловский, Ф. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
5. Abeles, B. Structural and electrical properties of granular metal films / B. Abeles, P. Sheng, M. Coutts, Y. Arie // Adv. Phys. – 1975. – Vol. 24. – P. 407 – 461.
6. Sheng, P. Hopping conduction in granular metals / P. Sheng, B. Abeles, Y. Arie // Phys. Rev. Lett. – 1973. – Vol. 33, № 21. – P. 44–47.

рый характерен для магнитно-неоднородных сред [14]. Найти сведений о магнитном фазовом переходе в железе и его оксидах в области температур  $T \approx 40 \text{ К}$ , который также может привести к аномалии в температурной зависимости сопротивления магнитоупорядоченной среды, не удалось.

В заключение отметим, что последующий высокотемпературный отжиг синтезированных пленок железа в условиях вакуума, приводящий к существенному улучшению их структурного совершенства, приводит к исчезновению отрицательного температурного

7. Sheng, P. Fluctuation-induced tunneling conduction in disordered materials / P. Sheng // Phys. Rev. Lett. – 1980. – Vol. 21, № 6. – P. 2180 – 2195.
8. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1031 с.
9. Sefrioui, Z. Correlation between magnetic and transport properties in nanocrystalline Fe thin films: A grain-boundary magnetic disorder effect // Physical Review. – 2001.–Vol. 64. – P. 224431-224431-4.
10. Lyadov, N.M. // N.M. Lyadov, F.G. Vagizov, I.R. Vakhitov, A.I. Gumarov, Sh. Z. Ibragimov, D.M. Kuzina, I.A. Faizrakhmanov, R.I. Khaibullin, V.A. Shustov // Vacuum. – 2019. – Vol. 168. – P. 108860.
11. Головчук, В.И. Корреляция электрических, гальваномагнитных и магнитных характеристик нанокристаллических пленок железа, полученных методом ионно-ассистированного осаждения / Головчук В.И. [и др.] // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, № 12. – С. 2096-2105.
12. Забродский, А. Г. Низкотемпературная проводимость и переход металл – диэлектрик в компенсированном германии / А. Г. Забродский, К. Н. Зиновьева // ЖЭТФ. – 1984. – Т. 59, № 3. – С. 727-742.
13. Heines, A. Conductivity of weakly insulating amorphous nickel – silicon films below the metal – insulator transition / A. Heines [et al.] // Phys. Stat. Sol (B). – 1998. – Vol. 205. – P. 237 – 240.
14. Hongshi Li, Xuan Li Damping constant measurement and inverse giant magnetoresistance in spintronic devices with Fe<sub>4</sub>N / Xuan Li, Hongshi Li, Mahdi Jamali // Aip advances. – 2017. – Vol. 7. – P. 125303.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ В ВАКУУМЕ НА НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИЕ ДЕФЕКТЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Г. А. Гусаков<sup>1</sup>, Г. В. Шаронов<sup>1</sup>, И. И. Азарко<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Беларусь, e-mail: gga68@rambler.ru*

<sup>2)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь, e-mail: azarko@bsu.by*

Исследовано влияние постростовой термообработки в вакууме на дефектно-примесную структуру монокристаллов НРНТ-алмаза, выращенных методом температурного градиента в системе Ni-Fe-C. Показано, что исходные кристаллы НРНТ-алмаза, содержат примесь никеля не только в форме одиночных атомов, но и в форме наноразмерных кластеров. В процессе вакуумного отжига при  $T \geq 800$  °С начинается диссоциация этих кластеров. Этот процесс полностью завершается при  $T = 1000$  °С. При  $T > 1100$  °С начинается процесс агрегации примесных атомов никеля и азота с образование сложных дефектных комплексов.

**Ключевые слова:** монокристаллы синтетического алмаза; примеси азота и никеля; вакуумный отжиг.

## EFFECT OF VACUUM HEAT TREATMENT ON NICKEL-CONTAINING DEFECTS IN SYNTHETIC DIAMOND SINGLE CRYSTALS

G. A. Gusakov<sup>1</sup>, G. V. Sharonov<sup>1</sup>, I. I. Azarko<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> *A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Kurchatovst., 7, 220045, Minsk, Belarus*

<sup>2)</sup> *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*  
*Corresponding author: G. A. Gusakov (gga68@rambler.ru)*