

шенных при добавлении в питательную среду хлорида никеля монотонно снижается при увеличении ширины линии от 320 до 480 Гс.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Майстренко, В. К. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. К. Майстренко, Н. А. Ключев. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
2. Храмцова Е.А. Изучение устойчивости трансгенных растений *Nicotiana tabacum*, несущих бактериальный ACDS-ген, к загрязнению почвы солями никеля / Храмцова Е.А. и др. // Актуальные проблемы изучения фито- и микобиоты: Материалы IV между. науч.-практ. конф. – Минск: 2021. – С. 187–191.
3. Лапчук Н.М., Олешкевич А.Н., Поклонская О.Н. Парамагнетизм магнитоактивных примесей в целлюлозе листьев деревьев // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 сент. 2008 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.].— Мн.: БГУ, 2008.— С. 123—127.
4. Азарко И. И. и др. Изменение свободнорадикального состояния меланиновых полимеров в комплексах с ме-таллами // Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: Сб. научн. трудов 5-й Между-нар. научно-практ. конф., Минск —Мн., 2004. —С. 221–223.
5. Ч. Пул Техника ЭПР-спектроскопии. –М.:Мир, 1970.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, МАГНИТНЫЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ, ИМПЛАНТРОВАННЫХ ИОНАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ, КАК ЭФФЕКТИВНАЯ БАЗА ИЗУЧЕНИЯ СПИН-ЗАВИСИМЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА

**В. И. Головчук, М. Г. Лукашевич**

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь  
e-mail: Lukashevich@bsu.by*

Приведено обобщение основных электрических, магнитных и гальваномагнитных характеристик ряда полимерных пленок, модифицированных имплантацией переходных металлов. Анализируются причины наличия или отсутствия переходов ди-электрик-металл и диамагнетик-ферромагнетик через суперпарамагнитное состояние формирующихся при имплантации включений. Показано, что результаты экспериментального изучения температурной зависимости сопротивления и намагниченности, а также петель гистерезиса намагниченности и магниторезистивного эффекта являются прекрасным иллюстративным материалом для формирования базовых знаний по физическим принципам управления спин-зависимыми процессами электронного транспорта, и могут эффективно использоваться как в спецкурсе «Спинтроника», так и при разработке приборных структур спинтроники.

**Ключевые слова:** спинтроника; ион; имплантация; полимер; проводимость; намагниченность; магнитосопротивление.

# ELECTRIC, MAGNETIC, AND GALVANOMAGNETIC PROPERTIES OF POLYMERS IMPLANTED WITH TRANSITION METAL IONS AS AN EFFECTIVE BASE FOR STUDYING SPIN-DEPENDENT ELECTRON TRANSPORT PROCESSES

V. I. Golovchuk, M. G. Lukashevich

---

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*  
*Corresponding author: M. G. Lukashevich (Lukashevich@bsu.by)*

A generalization of the main electrical, magnetic and galvanomagnetic characteristics of a number of polymer films modified by implantation of transition metals is given. The reasons for the presence or absence of dielectric-metal and diamagnet-ferromagnet transitions through the superparamagnetic state of inclusions formed during implantation are analyzed. It is shown that the results of an experimental study of the temperature dependence of resistance and magnetization, as well as magnetization hysteresis loops and the magnetoresistive effect, are excellent illustrative material for the formation of basic knowledge on the physical principles of controlling spin-dependent processes of electron transport, and can be effectively used both in the special course "Spintronics", and in the development of device structures for spintronics.

**Key words:** spintronics; ion; implantation; polymer; conductivity, magnetization, magnetoresistance.

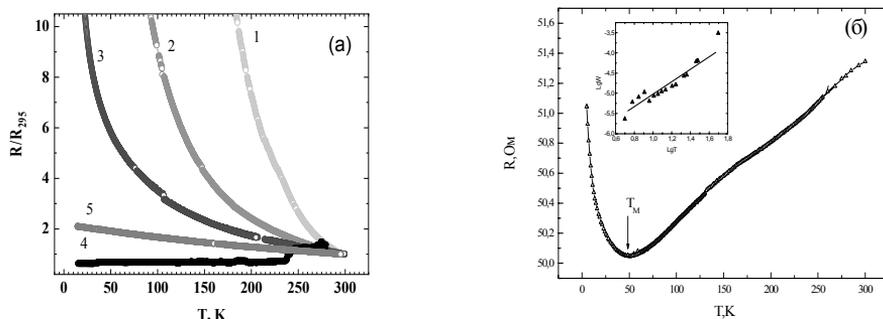
## ВВЕДЕНИЕ

Присуждение Нобелевской премии за открытие гигантского магниторезистивного эффекта [1, 2] вызвало огромный интерес к изучению спин-зависимых процессов в конденсированных средах, преимущественно в тонких пленках и многослойных структурах с магнитным упорядочением, находящихся по обе стороны перехода диэлектрик-металл (ПДМ). Можно с уверенностью сказать, что это послужило отправной точкой рождения нового научно-технического направления, получившего название спинтроники [3]. В ведущих классических университетах появились новые специальные курсы лекций, обусловленные необходимостью глубокого изучения размерно- и спин-зависимых процессов, а именно: наноэлектроника, спинтроники и нанофотоника. В [4] рассмотрены особенности построения программы курса лекций по физическим основам спинтроники и возможности организации лабораторного сопровождения этого курса путем постановки лабораторных работ по изучению спин-зависимых процессов без использования высокотехнологичного оборудования путем измерения магниторезистивного эффекта и эффекта Холла в тонких магнитоупорядоченных пленках при комнатной температуре в учебной лаборатории. В данной работе мы акцентируем внимание на возможности эффективного использования результатов экспериментальных и теоретических исследований модификации таких электрофизических характеристик как проводимость, намагниченность и магниторезистивный эффект в тонких полимерных пленках имплантацией ионов не магнитных и магнитных металлов, являющейся одной из наиболее эффективных технологий современной твердотельной микро и наноэлектроники.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Напомним, что программа спецкурса включает теоретическое изучение основных механизмов переноса носителей заряда в конденсированных средах и физические аспекты возникновения базовых эффектов классической магнитоэлектроники и спинтроники: магниторезистивного эффекта и эффекта Холла в классических и квантовых магнитных полях в твердых телах по обе стороны ПДМ как в диамагнитных, так и магнитоупорядоченных. Отметим, что спин-зависимые процессы рассеяния обычно рассматриваются на металлической стороне перехода, а спин-зависимые процессы туннелирования – на диэлектрической. В этом отношении в изначально диэлектрические и диамагнитные полимерные пленки имплантацией ионов переходных металлов позволяют получить в них приповерхностный или заглубленный проводящий слой по обе стороны ПДМ, находящийся в диамагнитном, суперпарамагнитном или ферромагнитном состоянии, а полученные результаты позволяют эффективно демонстрировать фазовые переходы и возможности ионной имплантации при создании спинтронных тонко- и многослойных структур. Обобщение результатов таких исследований в ряде полимерных пленок, модифицированных имплантацией не магнитных и магнитных ионов приведено в [4].

Как и следовало ожидать увеличение дозы имплантации независимо от типа ионов и полимера приводит к уменьшению сопротивления модифицированного слоя, однако эта зависимость существенно различается для не магнитных и магнитных ионов. Так при имплантации ионов ( $\text{Cu}^+$  и  $\text{Ag}^+$ ) в интервале доз до  $1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  ПДМ не наблюдается, в то время как при имплантации ионов магнитных металлов ( $\text{Fe}^+$  и  $\text{Co}^+$ ) наблюдаются процессы перехода к диффузионному механизму электронного транспорта через процессы слабой локализации. Прекрасным примером формирования проводящего слоя с переходом диэлектрик-металл с учетом процессов слабой локализации на металлической стороне перехода могут служить приведенные на рис. 1 и рис. 2 температурные зависимости сопротивления пленок полиэтилентерефталата и полиимида, имплантированных ионами железа и кобальта.

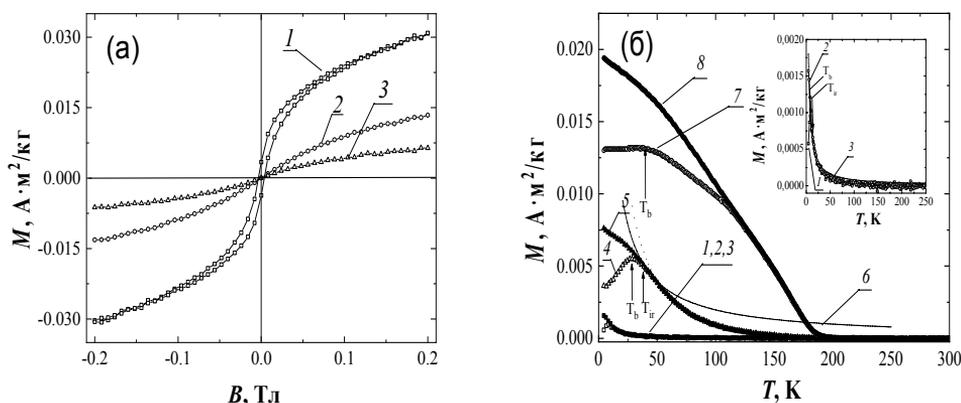


На вставке температурная зависимость локальной энергии активации

Рисунок 1. Температурные зависимости сопротивления пленок полиэтилентерефталата, имплантированных  $\text{Fe}^+$  при плотности тока  $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ ;  $D, \text{ см}^{-2}$ : 1 –  $2,5 \cdot 10^{16}$ ; 2 –  $5 \cdot 10^{16}$ , 3 –  $7,5 \cdot 10^{16}$ , 4 –  $1 \cdot 10^{17}$ , 5 –  $1,25 \cdot 10^{17}$  (а) и полиимида, имплантированного  $\text{Co}^+$   $D = 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ,  $j = 12 \text{ мкА/см}^2$  (б)

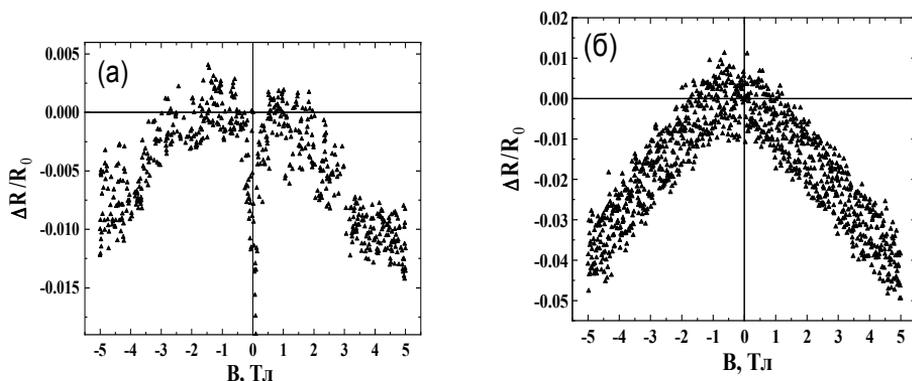
Экспоненциальное увеличение сопротивления при понижении температуры легко объяснимо с точки зрения уже изученных ранее современных теоретических представлений о прыжковом или туннельном механизмах переноса [5-7] или процессах слабой локализации на металлической стороне ПДМ в низкотемпературной области [8]. В то же время вопрос отсутствия ПДМ при имплантации меди и серебра и его появление при имплантации железа и кобальта является дискуссионным и может служить «затравкой» для проведения студентами поисковых исследований по характеру взаимодействия разных ионов с формирующейся карбонизированной структурой в модифицированном слое.

Имплантация магнитных ионов приводит и увеличению намагниченности пленки вследствие внедрения парамагнитных атомов и формирования суперпарамагнитных включений при увеличении дозы имплантации, что является принципиальным при разработке приборных структур спинтроники, а знание дозовой зависимости проводимости и намагниченности, а также критических доз фазовых переходов позволяет создавать спинтронные структуры с использованием гигантского или туннельного магниторезистивных эффектов, наблюдающихся в структурах с металлическим и диэлектрическим режимом переноса электронов. На рис. 2 показаны петли гистерезиса намагниченности и температурные зависимости намагниченности, демонстрирующие зарождение и увеличение размеров формирующихся магнитных включений в модифицированном слое, который может быть на диэлектрической или металлической сторонах ПДМ, теоретическое описание которых требует введения суперпарамагнитного состояния формирующихся включений и позволяет проводить оценку размера включения по величине магнитного момента [9].



На вставке – температурная зависимость намагниченности для  $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$   
 Рисунок 2. Петли гистерезиса намагниченности пленок полиимида, имплантированных  $\text{Co}^+$   $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ;  $T, \text{ K}$ : 1 – 15; 2 – 100; 3 – 300 (а) и температурные зависимости намагниченности нанокластеров  $\text{Co}^+$  при  $D, \text{ см}^{-2}$ :  $5 \cdot 10^{16}$  (1, 2);  $7,5 \cdot 10^{16}$  (4, 5);  $1,25 \cdot 10^{17}$  (7, 8) (б).  
 Пунктирные линии 3 и 6 – теоретический расчет по формуле Ланжевена

Типичные для основного эффекта спинтроники магнитные зависимости магниторезистивного эффекта приведены на рис. 3, а, б соответственно для слоев на металлической и диэлектрической сторонах ПДМ.



**Рисунок 3.** Магнитосопротивление пленки ПЭТФ, имплантированной  $\text{Fe}^+$ ,  $D = 7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  с диэлектрическим режимом переноса (а) и  $D = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  с металлическим режимом переноса (б) при  $T = 4,2 \text{ K}$  и  $j = 4 \text{ мкА/см}^2$

Как видно знак эффекта отрицателен, что свидетельствует о доминировании спин-зависимых процессов электронного транспорта. При этом величина эффекта и особенности функциональной зависимости от магнитного поля определяются стороной ПМД на которой находится модифицированная пленка. На рис. 3, а можно отметить наличие особенностей на магнитолевой зависимости в виде резких пиков в области слабых магнитных полей, которые могут быть связаны с формирующейся доменной структурой и рассеянием электронов границами домен при перемагничивании образца. Представленные экспериментальные зависимости позволяют прекрасно иллюстрировать возможности ионной имплантации при создании тонко-и многослойных структур по обе стороны перехода диэлектрик-металл, которые могут находиться в суперпарамагнитном или ферромагнитном состоянии, демонстрировать спин-зависимые процессы электронного транспорта и могут использоваться при изготовлении приборных структур спинтроники.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный комплекс исследований электрических, магнитных и гальваномагнитных характеристик тонких полимерных пленок, модифицированных имплантацией ионами переходных металлов, представленный как температурные зависимости сопротивления, намагниченности и магниторезистивного эффекта, позволяет не только показать эффективность ионной имплантации при формировании спинтронных структур с разными механизмами электронного транспорта и разным магнитным состоянием, но и глубже понять физические модели описания процессов рассеяния и туннелирования электронов с учетом наличия у них собственного магнитного момента, т.е. может эффективно использоваться в спецкурсе «Спинтроника». Он также может быть использован в спецкурсах «Электронная теория полупроводников» и «Электронные состояния и процессы в конденсированных средах» при изучении теорий перехода Мотта и Андерсона, а также магнитных фазовых переходов соответственно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M. N. Baibich [ et. al. ] // Phys. Rev. Lett. – 1988. – Vol. 61, № 21. – P. 2472–2475.
2. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch [ et. al. ] // Phys. Rev. B. – 1989. – Vol. 39, № 7. – P. 4828–4830.
3. Zutic, I. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // Rev. Mod. Phys. – 2004. – V.76. – P. 323–410.
4. Особенности изучения спин-зависимых электронных состояний и процессов в курсе лекций “Спинтроника” и проведении лабораторных работ / Головчук В.И., Лукашевич М.Г. // Материалы и структуры современной электроники : сборник научных трудов VII Международной научной конференции, посвященной 50-летию кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники, Минск, 14–16 октября 2020 г. / редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. — Минск : Изд. центр БГУ, 2020.
5. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – 2-е изд., перераб. и доп. в 2 – х томах. – М.: Мир, 1982. – 664 с.
6. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников/ Б. И. Шкловский, Ф. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
7. 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.
8. Bergman, G. Weak localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol.107, № 1. – P. 1–58.
9. Bean, C.P. Superparamagnetism / C.P. Bean, J. D. Livigston // J. Appl. Phys. Supplement. – 1959. – Vol. 30, № 4. – P. 120S – 129S.

## ГРАДООТВОДЫ НАРКЕВИЧА-ИОДКО И ПОИСК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

О. А. Гапоненко<sup>1</sup>, Н. А. Поклонский<sup>2</sup>, В. А. Самуйлов<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> *Национальная академия наук Беларуси, пр. Независимости, 66, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: Olga@presidium.bas-net.by*

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

<sup>3)</sup> *State University of New York at Stony Brook, Department of Materials Science and Chemical Engineering, Stony Brook, NY11794 e-mail: Vladimir.Samuilov@stonybrook.edu*

В 80-х годах XIX века белорусский естествоиспытатель профессор Якуб Наркевич-Иодко предложил концепцию градоотводов. Указывая на аналогию между градоотводом и молниеотводом, он впервые отметил, что градоотводы являются «мягкими» стоками атмосферного электричества на земную поверхность. Многочисленные попытки использования электрического поля Земли напрямую в качестве источника электроэнергии до сих пор не показали практической целесообразности. Но в последнее время экспериментально установлено, что при взаимодействии влажного воздуха и гидрофильной поверхности микро- и наноструктурированных углеродных материалов может быть получена электроэнергия значимой величины. Этот способ получения электроэнергии – суть гигроэлектричества.

**Ключевые слова:** градоотвод; атмосферное электричество; пары воды; гигроэлектричество; гидрофильные углеродные материалы; оксид графена.