

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Стародубцев, Н. Аморфные металлические материалы. / Ю.Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров / Силовая электроника. – 2009. – № 9. – с.86–89.
2. Electric properties and crystallization behavior of Al-TM-REM amorphous alloys. / Rusanov, B. [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – № 787. – pp. 448–451.
3. Behaviour of $\text{Al}_{86,0}\text{Co}_{7,6}\text{Ce}_{6,4}$ Glass Forming Alloy With Different Microstructures. / Li, C.L. [et al.] // Corrosion Applied Surface Science. – 2016. – V.384. – pp. 116–124.
4. Кристаллизация и аморфизация металлических систем. / А.П. Шпак и др. – Киев: Академперіодика, 2002. – 207 с.
5. Новиков, В.Н. Методика дилатометрических исследований металлических стекол. / В.Н. Новиков, Б.Е. Рябчиков // Заводская лаборатория. – 1989. – Т.55. – с. 49–53.
6. Термодинамический анализ и практическая реализация очистки аморфной фазы от замороженных центров кристаллизации. / Лысов, В.И. и др. // Журнал физической химии. – 2017. – Т. 91, № 12. – с. 28–32.

ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ СПИН-ЗАВИСИМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ И ПРОЦЕССОВ В КУРСЕ ЛЕКЦИЙ «СПИНТРОНИКА» И ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В. И. Головчук, М. Г. Лукашевич

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

Рассмотрены основные вопросы построения программы специального курса лекций «Спинтроника», а также увязки и оптимизации проведения спецпрактикума по изучению спин-зависимых состояний и процессов переноса носителей заряда в конденсированных средах. Обсуждается последовательность изложения материала по изучению основных гальваномагнитных явлений в магнитоупорядоченных средах в классических и квантующих магнитных полях.

Ключевые слова: спинтроника; гальваномагнитные явления; эффект Холла; эффект Кондо.

PECULIARITIES OF STUDYING SPIN-DEPENDENT ELECTRONIC STATES AND PROCESSES IN THE COURSE OF LECTURES "SPINTRONICS" AND CONDUCTING LABORATORY WORKS

V. I. Golovchuk, M. G. Lukashevich

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

The main issues of designing a program for a special course of lectures “Spintronics”, as well as linking and optimizing a special workshop on studying spin-dependent states and processes of charge carrier transfer in condensed media are considered. The sequence of presentation of material on the study of the main galvanomagnetic phenomena in magnetically ordered media in classical and quantizing magnetic fields is discussed.

Key words: spintronics; galvanomagnetic phenomena; Hall effect; Kondo effect.

ВВЕДЕНИЕ

Не секрет, что наиболее эффективное усвоение знаний по физике электронных состояний и процессов в конденсированных средах происходит при согласовании лекционных курсов с выполнением лабораторных работ. Открытие таких явлений как квантовый эффект Холла и гигантский магниторезистивный эффект определило огромный интерес как исследователей, так и разработчиков магнитоэлектронных приборов, к изучению и использованию спиновой зависимости электронных процессов как в объемных твердых телах так и в тонко- и многослойных структурах на основе диэлектриков, полупроводников и металлов с разным типом магнитного упорядочения. Надо отметить, что необычность гальваномагнитных явлений в магнитоупорядоченных средах было отмечено еще американским аспирантом Холлом, открывшим одноименный эффект, при изучении этого эффекта. Однако прошло еще не одно десятилетие прежде чем эффект получил ясное физическое трактование.

Наличие собственного магнитного момента у электрона наиболее отчетливо проявляется при сравнении температурных зависимостей сопротивления диамагнитных и магнитоупорядоченных твердых тел в виде немонотонной зависимости сопротивления при магнитном фазовом переходе. Первое теоретическое объяснение спиновой зависимости электронных процессов переноса было дано Моттом в начале 30-х годов [1]. Однако на протяжении достаточно длительного периода развития твердотельной электроники, включая период микроэлектроники, влияние спина на процессы переноса практически не учитывалось, несмотря на открытие таких эффектов как эффект Кондо и отрицательный магниторезистивный эффект [2, 3], при интерпретация которых использовались представления о спиновой зависимости процессов рассеяния носителей заряда.

В период интенсивного развития физики полупроводников и полупроводниковых приборов основные механизмы рассеяния электронов были достаточно хорошо изучены без учета наличия у электрона собственного магнитного момента [4]. Ситуация кардинально изменилась при переходе размеров изделий твердотельной электроники в нанометровую область и, в частности, после открытия гигантского магниторезистивного эффекта [5] и стремительно выросшему интересу к открытому ранее туннельному магниторезистивному эффекту [6]. Эти эффекты стали отправной точкой зарождения нового научно-технического направления, получившего название спиндинамика или спинтроника, как одного из направлений наноэлектроники. Фактически, это означало переход от классической магнитоэлектроники, использующей гальваномагнитные явления для решения чисто практических задач, на следующий уровень с учетом влияния собственного магнитного момента электрона на физические процессы в твердом теле, т.е. спинтронике, в частности на проявление его в таких гальваномагнитных явлениях как спиновый эффект Холла, гигантский и туннельный магниторезистивные эффекты. Понятно, что учет спиновой зависимости электронных процессов переноса не ограничивается только изучением спиновой зависимости процессов рассеяния или туннелирования, а требует осмысления спиновой зависимости прыжкового транспорта в режиме сильной локализации и на металлической стороне перехода диэлектрик-металл в режиме слабой локализации.

Отмеченное выше потребовало смещения акцентов изучения электронных процессов в область более глубокого изучения именно их спиновой зависимости и, в особенности в магнитоупорядоченных средах и многослойных структурах с их ис-

пользованием, при наложении внешнего магнитного поля. Анализ учебной и монографической литературы показал, что основные сведения по этим вопросам в основном сосредоточены в монографиях и обзорных статьях, значительная часть которых рассматривает конкретные материалы и условия [7]. Более того, если магнетизму твердых тел посвящено огромное число монографий и учебников, то изучение гальваномагнитных явлений в них даже в классическом представлении испытывает огромный дефицит, не говоря уже о спиновом эффекте Холла или механизмах возникновения магниторезистивного эффекта и эффекта Холла в магнитоупорядоченных средах с разным типом доменных стенок. Так к настоящему времени нет устоявшихся представлений о характере влияния стенок на величину сопротивления и его изменения при перемагничивании магнитоупорядоченных сред конечных размеров.

В настоящее время единственным хорошим пособием по вышеотмеченным вопросам спиновой зависимости электронных процессов переноса является методическое пособие [8], дающее прекрасное представление об основных гальваномагнитных явлениях как в диамагнитных, так и магнитоупорядоченных средах с учетом спиновой зависимости электронных процессов переноса на базе оригинальных статей, которое иллюстрируется низкотемпературными экспериментальными данными на основе гетероструктур, полученных современными технологическими приемами. На наш взгляд, такая логика построения программы изучения должна быть дополнена изучением современных представлений об основных механизмах переноса носителей заряда в конденсированных средах по обе стороны перехода диэлектрик-металл. При этом особое внимание следует уделить процессам сильной [9] и слабой локализации [10], и особенностям гальваномагнитных явлений в этих случаях с учетом их спиновой зависимости. Вторым принципиальным моментом является теоретическое изучение изменения энергетического спектра носителей заряда в магнитном, рассмотрение деления магнитного поля на область классических и квантующих магнитных полей, которые можно рассматривать как классически слабые и сильные, а область квантующих полей как квантовый и ультраквантовый пределы [11].

Предложенная в [8] программа несомненно продуктивна и особенно эффективна в научных центрах, обладающих высокими технологиями и возможностями низкотемпературных измерений в сильном магнитном поле. Однако при выполнении лабораторных работ один эксперимент замыкается на целую группу, что не может не сказаться на качестве подготовки физика-экспериментатора, экспериментальные навыки которого оттачиваются при непосредственном проведении измерений. Поэтому разумной альтернативой дополнения программы изучения теории спинзависимых процессов в твердом теле и структурах на основе магнитоупорядоченных сред может быть постановка лабораторной работы на основе тонких магнитоупорядоченных пленок разной геометрии и размеров, в которой предполагается измерение при комнатной температуре в интервале слабых и сильных магнитных полей (поле меньше и больше поля технической намагниченности) обычного, экстраординарного и планарного эффектов Холла, а также магнитопольевых зависимостей анизотропного и лоренцевского магниторезистивного эффекта при варьировании геометрии образца от диска Корбино, до длинного и тонкого стержня с измерением эффектов в магнитном поле при разных углах между плоскостью пленки и направлением магнитного поля. В таких образцах стандартными методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии легко изучить морфологию поверхности и магнитную микроструктуру, а

измерение гальваномагнитных эффектов провести с изменением направления магнитного поля (изучение гистерезиса). Это позволяет выделить влияние спин-зависимого рассеяния, рассеяния на доменных стенках, которые отчетливо проявляются при перемагничивании в обратном направлении. Использование набора образцов с разной геометрией, расположенных на многоконтактном чипе, согласованном с держателем образца, позволяет быстро провести цикл магнитолевых и угловых зависимостей эффектов Холла и магниторезистивного эффекта [12]. В тоже время самостоятельное проведение вышеуказанных измерений позволяет не только лучше освоить методику измерения гальваномагнитных эффектов, но и глубже понять особенности теоретического описания из-за необходимости осмысленного проведения измерений на тонкопленочных образцах разных размеров и формы при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца, а также направлением тока в образце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение спиновой зависимости электронных состояний и процессов в твердых телах и структурах на их основе должно начинаться с изучения основных механизмов переноса зарядов в них, влияния магнитного поля на энергетический спектр и процессы переноса носителей заряда. Особое внимание следует обратить на процессы сильной и слабой электронной локализации и влияние внешнего магнитного поля на эти процессы без учета и с учетом наличия у носителя заряда собственного магнитного момента. Следующим шагом в изучении следует рассматривать изучение особенностей переноса носителей зарядов во внешнем магнитном поле в магнитоупорядоченных средах, обратив внимание на такие эффекты как эффект Кондо и отрицательный магниторезистивный эффект, а также гигантский туннельный магниторезистивный эффекты, спиновый эффект Холла. Лабораторное сопровождение курса должно подтверждаться изучением гальваномагнитных явлений в тонких магнитоупорядоченных пленках в образцах, с изменяющейся геометрией от диска Корбино до длинного тонкого стержня при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью пленки, а также магнитного поля и тока образца при комнатной температуре. Это позволит проследить влияние разных компонент гальваномагнитных явлений (включая спин-зависимую) на знак, величину и вид магнитолевой зависимости изучаемого гальваномагнитного явления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Mott, N. F. The electrical conductivity of transition metals / N. F. Mott // *Proc. Roy. Soc.* – 1936. – Vol. A 156. – P. 669–726.
2. Kondo, J. Anomalous Hall Effect and Magnetoresistance of Ferromagnetic Metals / J. Kondo // *Progress of Theoretical Physics.* –1962. – Vol. 27. – P. 772–792
3. Toyozawa, Y. Theory of localized spins and negative magnetoresistance in metallic impurity conduction / Y. Toyozawa // *J. Phys. Soc. Japan.* – 1962. – Vol. 17 – P. 986–1024.
4. Киреев, П. С. Физика полупроводников / П. С. Киреев. – М.: Высшая школа, 1975. – 583 с.
5. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M. N. Baibich [et. al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61, № 21. – P. 2472–2475.
6. Julliere, M. Tunneling between ferromagnetic films / M. Julliere // *Physics Letters.* – 1975. – Vol. 54 A, № 3. – P. 225–226.
7. . Zutic, I. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // *Rev. Mod. Phys.* – 2004. – V.76. – P. 323–410.
8. Кудрин, А.В. Гальваномагнитные свойства ферромагнитных наноструктур. / А.В. Кудрин // Учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород, ННГУ, 2010. – 77 с.

9. 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.
10. Bergman, G. Weak localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol.107, № 1. – P. 1 – 58.
11. Adams, E. N. Quantum theory of transverse galvanomagnetic phenomena / E. N. Adams, T. D. Holstein // J. Phys. Chem. Sol. – 1959. – Vol. 10, № 4. – P. 254–276.
12. Изучение спин-зависимых процессов переноса электронов в магнитоупорядоченных средах / Головчук В.И., Лукашевич М.Г., Дятел А.Ю. // Акт о практическом использовании результатов исследования №2.4/130 от 27.05.2020.

ПРЕПОДАВАНИЕ СТУДЕНТАМ ВОПРОСОВ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРОВ

В. И. Попечиц

*НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Беларусь,
e-mail: Papechyts@bsu.by*

Рассмотрены вопросы преподавания студентам современных перспективных направлений развития компьютеров и систем искусственного интеллекта. Проанализированы достоинства и ожидаемые сложности создания оптических компьютеров, перспективы развития нанофотоники; нейрокомпьютеров, состоящих из большого числа параллельно работающих вычислительных элементов (нейронов) и перерабатывающих информацию на основе принципов работы естественных нейронных сетей; квантовых компьютеров, работающих на квантовом принципе суперпозиции отдельных квантовых состояний; молекулярных компьютеров, функционирующих на основе, так называемых «интеллектуальных» молекул и молекулярных систем; биокомпьютеров (ДНК-компьютеры и клеточные компьютеры), работающих на основе биологических компонентов как живой организм. Показаны возможности и недостатки разрабатываемых компьютеров нового типа по сравнению с существующими компьютерами, созданными на основе полупроводниковых, микро- и нанoeлектронных элементов.

Ключевые слова: современные компьютеры; оптические компьютеры; нейрокомпьютеры; квантовые компьютеры; молекулярные компьютеры; биокомпьютеры.

TEACHING STUDENTS QUESTIONS PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF COMPUTERS

V. I. Papechits

*A. N. Sevchenko Research Institute of applied physical problems
of the Belarusian state University, Kurchatov street, 7, 220045, Minsk, Belarus,
Corresponding author: V. I. Papechyts (Papechyts@bsu.by)*

The article deals with the issues of teaching students modern promising directions for the development of computers and artificial intelligence systems. The advantages and ex-