

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бондарева Ильи Александровича
«Влияние магнитного поля на латеральный фотовольтаический эффект в гибридных
структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si», представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

С развитием нанотехнологий в оптоэлектронике появляется множество новых материалов и конструкций, которые предлагают альтернативу традиционным фотоэлектрическим эффектам и методам детектирования. Функциональное использование фотоэлектрического эффекта в наноструктурах перспективно для точного позиционирования и эффективного преобразования энергии. В этой связи разработка новых гибридных структур, сочетающих магнитные и полупроводниковые компоненты, и поиск методов управления их свойствами с помощью внешних воздействий (свет, магнитное поле) являются ключевыми направлениями современной физики конденсированного состояния и материаловедения. Среди функциональных материалов системы металл-полупроводник обладают непревзойдёнными преимуществами, включая надёжную стабильность, превосходные физические характеристики, интеграцию с кремниевыми технологиями и простоту изготовления. Такие структуры перспективны для создания энергоэффективных устройств управления светом и спином, магниточувствительных сенсоров положения, устройств с управляемым фотоэлектрическим откликом и т.д.

Таким образом диссертация И.А. Бондарева представляет собой фундаментальное исследование на стыке физики полупроводников, магнетизма и спинтроники. В работе впервые детально исследован латеральный фотовольтаический эффект (ЛФЭ) в структурах магнитный металл-полупроводник в криогенном температурном диапазоне, проведен анализ диффузионного транспорта при низких барьерах Шоттки, исследовано влияние поверхностных состояний на интерфейсе и внешнего магнитного поля на ЛФЭ. Корреляция магнитных свойств металлических пленок с полевыми зависимостями фотонапряжения также является новым и важным результатом. Практическая значимость диссертационной работы заключается в потенциальном применении полученных результатов для создания новых типов магнитных сенсоров, фоторезистивных устройств и элементов спинтроники, управляемых внешним магнитным полем.

Диссертационная работа И.А. Бондарева состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В первой главе представлен детальный анализ фотовольтаических эффектов, классификация фотоэффектов, механизмы латерального фотовольтаического эффекта (ЛФЭ) в гибридных структурах металл-диэлектрик-полупроводник. Особое внимание уделено влиянию состава и морфологии слоев на ЛФЭ, а также взаимодействию магнитного поля с фотоиндуцированными носителями.

Во второй главе описаны: методика синтеза образцов (Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si), аттестация структур (просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), спектральная эллипсометрия, рентгеноструктурный анализ), оригинальная экспериментальная установка для измерения транспортных свойств в широком диапазоне температур (4.2–300 К), магнитных полей (до 1.2 Тл) в широком спектральном интервале (0.2–3.2 мкм). Особое внимание уделяется точности контактных измерений и исключению влияния термоэффектов.

В третьей главе диссертационной работы приводятся результаты систематического исследования латерального и поперечного фотовольтаического эффекта в гибридных структурах $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ и $\text{Fe/SiO}_2/\text{p-Si}$ в условиях варьирования параметров оптического облучения (длина волны, мощность) и температуры. И.А. Бондарев отмечает, что спектральные зависимости ЛФЭ могут быть качественно описаны моделями диффузии носителей с учетом глубины поглощения света. Температурные зависимости латерального и поперечного фотонапряжения имеют пики, обусловленные поверхностными состояниями на границе SiO_2/Si . При низких температурах магнитное поле снижает ЛФЭ до 140%, что связано с силой Лоренца и сдвигом энергетических уровней поверхностных состояний. Выявлена корреляция между магнитными свойствами металлических пленок и ЛФЭ. При низких температурах магнитное упорядочение в пленках Fe приводит к асимметрии в зависимостях ЛФЭ. Важным результатом также является обнаружение ферромагнитной фазы MnSi в структуре $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$, которая искажает полевые зависимости ЛФЭ. Выявление критических мощностей излучения для насыщения ЛФЭ представляет ценность для прикладного использования.

В заключении диссертации Бондаревым И.А. приводятся основные результаты, которые систематизируют и конкретизируют полученные данные о поведении ЛФЭ в полученных структурах магнитный металл/полупроводник.

К содержанию диссертационной работы имеются несколько замечаний:

1. В работе упоминается образование ферромагнитной фазы MnSi на границе раздела структуры $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$, что используется для интерпретации данных низкополевого гистерезиса ЛФЭ. Однако прямых доказательств (например, данных РФЭС или ПЭМ с элементным анализом именно для этой конкретной структуры или образца) такого образования не приведено. Данные по отдельно выращенной пленке MnSi можно рассматривать только как косвенные доказательства.

2. Механизм влияния магнитного поля через сдвиг энергетических уровней поверхностных состояний, безусловно, интересен. Однако он описан только качественно. Было бы полезно видеть более глубокое теоретическое обоснование или оценку величины этого сдвига в рамках известных моделей (например, с учетом зеемановского расщепления).

3. В выводах упоминается, что сила Лоренца не может объяснить все низкотемпературные особенности, но детальный количественный вклад разных механизмов (сила Лоренца, сдвиг уровней, влияние магнитного порядка) в полевую зависимость ЛФЭ в различных температурных режимах не приведен.

4. В работе нет исследований зависимости ЛФЭ от формы (профиля) или размера светового пятна, геометрии освещения и поляризации излучения, отсутствуют оценки глубины скин-слоя в металле, что является важным для контроля механизмов ЛФЭ.

5. Хотя в работе изучаются ферромагнитные материалы (Fe), анализ ограничивается макроскопическими магнитными свойствами без обсуждения спин-поляризованного транспорта. Упоминание «спин-зависимого рассеяния» носит гипотетический характер без экспериментального подтверждения. Такой не учет спин-зависимых и поляризационных (п.4) эффектов ограничивает полноту исследования ЛФЭ.

6. В тексте встречаются опечатки и стилистические ошибки.

Несмотря на приведенные выше замечания, которые носят скорее уточняющий и рекомендательный характер и не умаляют значимости работы, диссертационное исследование И.А. Бондарева представляет собой завершённую самостоятельную научно-квалификационную работу, которая обладает высокой научной и практической ценностью. Степень достоверности результатов не вызывает серьёзных опасений. Используемые современные методы синтеза образцов (термическое испарение) и их характеристики (сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифракция, импедансная спектроскопия), а также комплексный подход к измерениям транспортных свойств в широком диапазоне параметров (T , H , λ , P), повторяемость результатов, свидетельствуют о надёжности экспериментальных данных. Теоретическое моделирование, хотя и упрощённое, качественно согласуется с экспериментом. Автореферат также адекватно отражает содержание и основные результаты диссертации.

Апробация работы является достаточной: результаты многократно докладывались на авторитетных международных и всероссийских конференциях. Публикационная активность также соответствует необходимым требованиям ВАК: по теме диссертации опубликовано 12 работ, 7 из них – в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science.

Можно отметить, что диссертационная работа И.А. Бондарева, несомненно, имеет потенциал для продолжения в направлении расширения диапазона магнитных полей и температур для полного подавления ЛФЭ и включения квантовых эффектов, использования других материалов (антиферромагнетики, топологические изоляторы) для усиления магнитофотоэлектрического отклика. Совмещение ЛФЭ и спиновых эффектов открывает путь к уникальным гибридным устройствам, которые позволяют управлять спиновыми состояниями с помощью света и генерировать спин-поляризованные токи без внешних магнитных полей.

Таким образом, диссертация Бондарева И.А. «Влияние магнитного поля на латеральный фотовольтаический эффект в гибридных структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si», соответствует Положениям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаю, что Бондарев Илья Александрович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией магнитных полупроводников, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д.18; +7 (343) 374-02-30; physics@imp.uran.ru; www.imp.uran.ru), кандидат физико-математических наук (01.04.07 - Физика конденсированного состояния).

22.09.2025 г.

Телегин Андрей Владимирович

Подпись Телегина А.В. заверяю:
Ученый секретарь ИФМ УрО РАН
кандидат физико-математических наук



Арапова И.Ю.

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Телегин Андрей Владимирович

Ученая степень и шифр специальности: кандидат физико-математических наук, 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Ученое звание: -

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), отдел наноспинтроники, лаборатория магнитных полупроводников

Должность: вед. науч. сотр., заведующий лабораторией магнитных полупроводников

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д.18;

E-mail: telegin@imp.uran.ru

Тел.: +7 (343) 374-02-30

Список работ по теме диссертации за последние пять лет (2021-2025 гг.):

1. А. В. Телегин, Ж. Ж. Намсаров, В. А. Бессонова, В. А. Антонов, С. В. Баталов, А. В. Огнев. Оценка взаимодействия Дзялошинского-Мория в металлических наногетероструктурах: методика и эксперимент // Физика твёрдого тела. – 2024. – Т. 66. – № 12. – С. 2294–2303.
2. А. В. Телегин, Т. Н. Павлов, В. М. Цвелиховская, Ж. Ж. Намсараев, В. А. Антонов, А. В. Огнев. Создание многослойных металлических пленок для изучения динамики киральных спиновых структур // Наноиндустрия. – 2024. – Т. 17. – № 7. – С. 444–453.
3. Ю. П. Сухоруков, А. В. Телегин, И. Д. Лобов, А. М. Коровин. Особенности магнитооптических эффектов Фарадея и Керра в наноразмерных пленках $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ // Оптика и спектроскопия. – 2024. – Т. 132. – № 7. – С. 740–746.
4. 7. А. В. Телегин, В. Д. Бессонов, В. С. Теплов, В. М. Цвелиховская. Синтез тонкопленочных магнитных структур для спин-орбитроники // Известия вузов. Электроника. – 2024. – Т. 27. – № 1. – С. 100–209.
5. А. В. Телегин, В. Д. Бессонов, И. Д. Лобов, В. С. Теплов. Эффективное токоиндуцированное перемагничивание в металлических наноструктурах // Физика твёрдого тела. – 2023. – Т. 65. – № 12. – С. 2250–2259.
6. Yu. Sukhorukov, A. Telegin. Magnetic Semiconductors as Materials for Spintronics // Magnetochemistry. – 2022. – V. 8. – № 12. – P. 173–198.
7. 12. Yu. P. Sukhorukov, A. V. Telegin, N. G. Bebenin, V. D. Bessonov, S. V. Naumov, D. A. Shishkin, A. P. Nosov. Strain-magnetooptics in single crystals of CoFe_2O_4 // Magnetochemistry. – 2022. – V. 8. – № 10. – P. 135–150.
8. V. A. Bessonova, A. V. Telegin, A. P. Nosov, E. I. Patrakov, M. V. Makarova, Yu. P. Sukhorukov. Mid-infrared optical response to magnetic field in the $\text{La}_{0.65}\text{Ba}_{0.35}\text{MnO}_3$ film grown by PLD // JMMM. – 2022. – V. 564. – P. 170030–170035.

9. Yu. P. Suhorukov, A. V. Telegin, K. G. Mikheev, R.G. Zonov, L.I. Naumova, G. M. Mikheev. Laser-induced graphene based visible and near-infrared radiation detector // Optical Materials. – 2022. – V. 133. – P. 112957–112963.
10. Ю. П. Сухоруков, А. В. Телегин, Е. А. Ганьшина. Одновременное управление интенсивностью отраженного и прошедшего света в тонких пленках манганитов // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – № 6. – С. 1017–1023.

Заведующий лабораторией магнитных полупроводников, ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов
имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН),
кандидат физико-математических наук



Телегин Андрей Владимирович

22.09.2025 г.

Подпись Телегина А.В. заверяю:
Ученый секретарь ИФМ УрО РАН,
кандидат физико-математических наук



Арапова И.Ю.