



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИАПУ ДВО РАН

чл.-корр. РАН А.А. Саранин

« 8 » сентября 2025г.

ОТЗЫВ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук на диссертационную работу Бондарева Ильи Александровича «Влияние магнитного поля на латеральный фотовольтаический эффект в гибридных структурах $\text{Fe/SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Актуальность темы диссертации

В настоящее время в современной электронике ведётся поиск новых и эффективных материалов для изготовления более совершенных электронных устройств на основе наноразмерных систем. Кроме того, отдельный интерес представляет исследование электронного транспорта и влияние внешнего магнитного поля на транспортные свойства данных систем. В данной связи привлекают внимание гибридные наноструктуры металл/диэлектрик/полупроводник (МДП) или металл/полупроводник (МП), объединяющие в себе полупроводниковые и магнитные материалы. Для устройств на основе гибридных структур, таких как спиновые вентили и магнитные туннельные структуры, характерна энергонезависимость, быстродействие и высокая стабильность, что находит применение в элементах магнитной памяти. Особый интерес представляет перспектива управления электронными и магнитными свойствами гибридных структур при помощи оптического излучения. Осуществление комплексного взаимодействия электронных, магнитных и оптических подсистем позволит расширить возможности практического применения гибридных структур. Подобный сценарий можно реализовать, при помощи фотовольтаических явлений в полупроводниках, в частности, латерального фотовольтаического эффекта (ЛФЭ), который находит применение в позиционных и

оптических сенсорах, а также в солнечных батареях. Исследуя характер отклика фотоиндуцированного напряжения на магнитное поле, а также внешние воздействия (температура, длина волны и мощность оптического излучения) можно определить оптимальную композицию наноструктуры для максимально эффективной реализации фотовольтаических явлений, а также обнаружить новые способы контроля транспорта фотоиндуцированных носителей, связанные с магнитным состоянием электронов в полупроводниках.

Целью настоящей работы являлось исследование транспорта фотогенерированных носителей заряда в МДП структурах и выявление механизмов влияния магнитного поля и магнитных свойств металла на данные процессы.

Для её достижения автором были поставлены **следующие задачи**:

1. Изучить поведение латерального и поперечного фотовольтаического эффекта в гибридных структурах $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$, при варьировании различных параметров эксперимента, в частности температуры, длины волны и мощности облучения. Определить влияние отдельных элементов структуры на фотоиндуцированный транспорт носителей заряда.
2. Исследовать отклик латерального и поперечного фотовольтаического эффекта в гибридных структурах $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ на внешнее магнитное поле, изучить характер поведения магнитосопротивления.
3. Установить основные механизмы влияния магнитного поля и определить корреляции между магнитными свойствами $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ и особенностями транспорта фотогенерированных носителей в них.

Новизна выполненных исследований и полученных результатов.

Все основные результаты работы являются новыми. К наиболее значимым результатам, полученным в ходе проведенного Бондаревым И.А. диссертационного исследования, следует отнести следующие:

- 1) Впервые исследован эффект латерального фотонапряжения в структурах металл/ $\text{SiO}_2/\text{p(n)-Si}$ в низкотемпературном диапазоне ($T < 40 \text{ K}$). Установлено, что в структурах с низким значением барьера Шоттки, фотовольтаический эффект в основном определяется диффузией неравновесных носителей заряда.
- 2) Показана роль электронных состояний, локализованных вблизи границы раздела SiO_2/Si , в транспорте фотовозбуждённых носителей заряда. Эти состояния влияют на рекомбинацию неравновесных носителей, посредством захвата и эмиссии

фотовозбуждённых электронов, что приводит к появлению особенностей на температурных и спектральных зависимостях фотовольтаического эффекта.

- 3) Обнаружена корреляция между магнитными свойствами металлической плёнки и полевыми зависимостями фотонапряжения в структуре Fe/SiO₂/p-Si, что указывает на влияние магнитного состояния плёнки железа на фотонапряжение.

Значимость результатов для науки и производства, и рекомендации по их использованию.

- 1) Результаты проведённых исследований предоставляют новую информацию о фотогенерированном транспорте носителей заряда в гибридных структурах. Полученные данные помогают сформировать представление о преимуществах/недостатках использования различных материалов в качестве фотовольтаических устройств, а также позволяют оптимизировать значения длины волны и мощности оптического излучения при проектировании устройств на основе фотовольтаического эффекта.
- 2) На зависимостях фотонапряжения от мощности излучения были обнаружены критические значения мощности (P_c), выше которых зависимости выходят на насыщение. Эти значения мощности могут рассматриваться как оптимальные для реализации ЛФЭ.
- 3) Механизм влияния магнитного поля на фотовольтаический эффект, связанный со сдвигом энергетических уровней поверхностных центров, демонстрирует возможность включения/выключения фотонапряжения внешним магнитным полем. Это открывает перспективы для создания магнитных фоторезистивных устройств на базе гибридных структур типа Mn/SiO₂/n-Si.
- 4) Корреляции между магнитным упорядочением металлических плёнок и фотонапряжением, обнаруженные в исследуемых структурах, демонстрируют потенциал для использования фотовольтаического эффекта в устройствах спинтроники.

В целом диссертация производит впечатление целого законченного исследования. Все задачи, поставленные в диссертационной работе, успешно решены.

Однако, по диссертации можно задать следующие вопросы и указать на некоторые недостатки:

- 1) Автор диссертации на 33-й странице вводится такой параметр как LPV и при этом он никак не расшифровывается. Хотя измерению этого параметра посвящена значительная часть работы.

- 2) Для более качественного сравнительного анализа экспериментальных данных для пленок разных металлов, автору работы стоило бы использовать подложки полупроводника одного типа проводимости, а также пленки металлов одинаковой толщины.
- 3) Отсутствует обсуждение свойств проводимости кремния в низкотемпературной области, хотя там наблюдаются критические переходы, связанные с примесными центрами, что для проводимого исследования весьма важно.
- 4) Зависимость LPV для $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ (Рис.36) объясняется образованием фазы силицида марганца, обладающей ферромагнитными свойствами. Однако, на снимке просвечивающей микроскопии (Рис.19(b)) отмечается образование только фазы оксида марганца. Почему MnSi не наблюдается просвечивающей микроскопией?
- 5) При обсуждении магнитооптических свойств структуры $\text{Mn/SiO}_2/\text{Si}$, к сожалению, не используется петля гистерезиса, приведенная на рис. 41. Кроме того, было бы полезно сравнить ее с петлей гистерезиса структуры MnSi/Si .
- 6) ПЭМ изображения демонстрируют наличие оксидов марганца (Рис.19(b)), которые могут быть и полупроводниками, причем магнитными. Однако, в обсуждении магнитные свойства оксида марганца не рассматриваются.
- 7) Для зависимости LPV для $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ (Рис.28) отсутствует объяснение максимума LPV в области 500-600 нм. Можно ли говорить о проявлении полупроводниковых свойств оксида марганца, у которого ширина запрещенной зоны 1.5 эВ?

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы, которая является законченным исследованием, выполненном на высоком научно-техническом уровне и вносящим весомый вклад в развитие новых электронных устройств на основе гибридных структур, работа которых основана на комплексном использовании их фото- и магнитотранспортных свойств. Результаты, представленные в диссертационной работе, были опубликованы в 7 статьях журналов, которые входят в Перечень ВАК РФ, и опубликованы в 5 сборниках тезисов международных конференций. Автореферат соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ и полностью отражает содержание диссертации.

В целом рассматриваемая диссертация «Влияние магнитного поля на латеральный фотовольтаический эффект в гибридных структурах $\text{Fe/SiO}_2/\text{p-Si}$ и $\text{Mn/SiO}_2/\text{n-Si}$ » Бондарева Ильи Александровича по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям установленным пп. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.),

Доклад Бондарева И.А. по диссертационной работе заслушан и обсужден на научном семинаре Отдела Физики Поверхности Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Протокол №1 от 15.07.2025). Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Отдела Физики Поверхности ИАПУ ДВО РАН (Протокол №2 от 25.08.2025).

Д.В. Грузнев

Телефон: (908) 442-59-74, e-mail: gruznev@iacp.dvo.ru

Д.В. Грузнев

Д.А. Цуканов
« 8 » сентября 2025г.

Сведения о ведущей организации
по диссертации 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

1.	Полное название ведущей организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
2.	Сокращенное название ведущей организации	ИАПУ ДВО РАН
3.	Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
4.	Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
5.	Место нахождения	г. Владивосток, Российская Федерация
6.	Почтовый адрес организации	690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5
7.	Телефон организации	+7 (423) 231-04-39
8.	Адрес электронной почты организации	director@iacp.dvo.ru
9.	Адрес официального сайта организации в сети Интернет	http://www.iacp.dvo.ru/
10.	Руководитель организации	Ромашко Роман Владимирович
11.	Наименование профильного структурного подразделения, занимающегося проблематикой диссертации	Отдел Физики Поверхности Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
12.	Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации	Исполняющий обязанности директора ИАПУ ДВО РАН, чл.-корр. РАН, Саранин Александр Александрович
13.	Сведения о составителе отзыва из ведущей организации	Грузнев Дмитрий Вячеславович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории технологии полупроводников и диэлектриков ИАПУ ДВО РАН
14.	Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации: 1. Т.А. Писаренко, В.В. Коробцов, А.А. Дмитриев, В.В. Балашев, В.В. Железнов, Особенности зонной структуры и механизма латеральной фотопроводимости в	

	гибридных структурах T/SiO₂/Si (T=Fe, Fe₃O₄, TiO₂)// Физика твердого тела, 64(8) (2022) стр.1101-1111. 2. V.V. Balashev, K.S. Ermakov, D.A. Tsukanov, A.Yu. Samardak, A.V. Ognev, A.S. Samardak, Thickness dependence of magnetic and magnetotransport properties of textured Fe₃O₄ ferrimagnetic films on SiO₂/n-Si(001)// J. Alloys Compd. 961, pp.170967(1-7) (2023) 3. N.V. Denisov, A.V. Matetskiy, A.N. Mihalyuk, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin. Magnetotransport in the double-atomic-layer rect-$\sqrt{7}\times\sqrt{3}$-In phase on Si(111)// Physical Review B, 2023, V.107, P.195305-8. 4. L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, Y.E. Vekovshinin, D.V. Gruznev, A.N. Mihalyuk, N.V. Denisov, A.V. Matetskiy, D.A. Olyanich, T.V. Utas, V.S. Zhdanov, A.V. Zotov, A.A. Saranin. Few monolayer Ga film on Si(111): Illusive gallene formation and localization instead of superconductivity// Mol. Syst. Des. Eng., 2023, Vol.8, P.604-610. 5. Балашев В.В., Шевлягин А.В., Приходченко А.В., Цуканов Д.А., Самардак А.Ю., Собиров М.И., Огнев А.В., Самардак А.С. Исследование кристаллической структуры, фазового состава и магнитных свойств текстурированных пленок магнетита, выращенных методом реактивного осаждения // Физика твёрдого тела 66(3) (2024), стр.370-376. 6. A.N. Mihalyuk, Yu.E. Vekovshinin, A.Y. Tupchaya, L.V. Bondarenko, D.V. Gruznev, S.V. Ereemeev, A.V. Zotov, A.A. Saranin. Promoting spin-polarized states in Bi/Si(111) interface mediated by Ba intercalation for advanced spintronics applications.// Scripta Materialia, Vol.239, 2024 P.115807-6. 7. N.G. Galkin, E.Yu. Subbotin, K.N. Galkin, D.L. Goroshko, O.A. Goroshko, D.B. Migas, A.B. Filonov, I.A. Tkachenko, A.Yu. Samardak, Ultra-thin and thin CrSi films on Si(111): II. Transport and magnetic properties // J. Mater. Chem. C Vol.13 (2025) 2875-2886 8. Писаренко Т.А., Цуканов Д.А., Балашев В.В., Яковлев А.А., Латеральный фотовольтаический эффект в структуре Fe₃O₄/SiO₂/n-Si: влияние толщины слоя SiO₂ //Журнал технической физики, 95 (4) 2025 стр.779-786.
--	---

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с её сотрудниками.

Ученый секретарь ИАПУ ДВО РАН
доктор физико-математических наук



[Handwritten signature]

Д.А. Цуканов
« 8 » сентября 2025г.