

На правах рукописи



Бондарев Илья Александрович

Влияние магнитного поля на латеральный фотовольтаический эффект в
гибридных структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si

1.3.12. Физика магнитных явлений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН).

Научный
руководитель:

Волков Никита Валентинович

д. ф.-м. н., профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», заместитель директора по общим вопросам.

Официальные
оппоненты:

Телегин Андрей Владимирович

к. ф.-м. н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией магнитных полупроводников, ведущий научный сотрудник.

Терещенко Олег Евгеньевич

д. ф.-м. н., профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией физики и технологии гетероструктур, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Зашита состоится «10» октября 2025 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.1.228.01 при ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50 стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте по адресу http://kirensky.ru/zdoc/2025/disser_bondarev_ia.pdf

Автореферат разослан «__» июля 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н., с. н. с.



Втюрин Александр Николаевич

Актуальность темы исследования

В настоящее время продолжается активное развитие электроники, ведётся поиск новых, более эффективных материалов для изготовления более совершенных электронных устройств, а также исследование фундаментальных вопросов, связанных с электронным транспортом в наноразмерных системах. Отдельный интерес представляет изучение влияния внешнего магнитного поля на транспортные свойства данных систем. В данной связи привлекают внимание гибридныеnanoструктуры металл/диэлектрик/полупроводник (МДП) или металл/полупроводник (МП), объединяющие в себе полупроводниковые и магнитные материалы. Устройства на основе гибридных структур, такие как спиновые вентили и магнитные туннельные структуры, обладают рядом полезных свойств (энергонезависимость, быстродействие и высокая стабильность), и находят применение в элементах магнитной памяти. В то же время полупроводниковые материалы составляют основу современной электроники, а свойства полупроводников можно контролировать в широких пределах, за счёт внесения примесей, варьирования температуры, а также приложением внешних воздействий, таких как электрическое поле и оптическое излучение.

Особый интерес представляет перспектива управления электронными и магнитными свойствами гибридных структур при помощи оптического излучения. Такой подход позволит исследовать комплексное взаимодействие электронных, магнитных и оптических подсистем, расширив возможности практического применения гибридных структур. Подобный сценарий можно реализовать, при помощи фотовольтаических явлений в полупроводниках, в частности, латерального фотовольтаического эффекта (ЛФЭ), который привлекает активное внимание в последние десятилетия, и находит применение в позиционных и оптических сенсорах, а также в солнечных батареях. Исследуя характер отклика фотоиндуцированного напряжения на магнитное поле, и иные внешние воздействия, такие как, температура, длина волны и мощность излучения, можно определить оптимальную композицию nanoструктуры для максимально эффективной реализации фотовольтаических явлений, а также обнаружить новые способы контроля транспорта фотоиндуцированных носителей, связанные с магнитным состоянием электронов в полупроводниках.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью настоящей работы является исследование транспорта фотогенерированных носителей заряда в МДП структурах и выявление механизмов влияния магнитного поля и магнитных свойств металла на фотовольтаический эффект. Для достижения поставленной цели были решены 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 транспорт фотоиндуцированных носителей заряда.

2. Исследовать отклик латерального и поперечного фотовольтаического эффекта в гибридных структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si на внешнее магнитное поле.

3. Установить основные механизмы влияния магнитного поля и определить корреляции между магнитными свойствами Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si и особенностями транспорта фотогенерированных носителей в них.

Выбор объектов исследований

В качестве объектов исследования были выбраны трёхслойные гибридныеnanoструктуры металл/диэлектрик/полупроводник состава Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si. Кремний был выбран вследствие хорошо изученных электрических свойств и широкого применения в современных полупроводниковых приборах. В качестве диэлектрического слоя использован оксид кремния (SiO₂), поскольку он формируется на кремнии с помощью относительно простой технологической процедуры. Металлические плёнки Fe и Mn выбраны из-за различий в их магнитном упорядочении, что даёт возможность исследовать влияние их магнитных свойств на фотовольтаический эффект. Также имеют значение величины работ выхода для железа и марганца, которые в сочетании с работами выхода и электронным сродством кремниевых подложек с разным типом проводимости, позволяют влиять на величины барьеров Шоттки конечных образцов, формируя различные зонные структуры. Такой подход позволил определить особенности влияния диффузионного и дрейфового транспорта фотоиндуцированных носителей заряда на фотонаряжение в гибридных структурах с барьером Шоттки.

Научная новизна

Впервые исследован эффект латерального фотонапряжения в структурах металл/SiO₂/p(n)-Si в низкотемпературном диапазоне ($T < 40$ К). Установлено, что в структурах с низким значением барьера Шоттки, фотовольтаический эффект в основном определяется диффузией неравновесных носителей заряда. Продемонстрировано, что зависимость фотовольтаического эффекта от длины волны излучения может быть качественно описана при учёте глубины поглощения света и квантовой эффективности подложки.

Показана роль электронных состояний, локализованных вблизи границы раздела SiO₂/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. Установлено наличие нетривиального влияния магнитного поля на

фотовольтаический эффект, выражающегося в смещении энергетических уровней поверхностных состояний, участвующих в транспорте фотогенерированных носителей заряда. Это проявляется в том, что в области низкотемпературных максимумов фотонапряжения, относительное изменение фотовольтаического эффекта под действием магнитного поля может достигать 140%.

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. Выявлены особенности поведения полевой зависимости латерального фотонапряжения в структуре Mn/SiO₂/p-Si, которые обусловлены наличием ферромагнитного моносилицида марганца формирующегося на границе раздела SiO₂/Si.

Практическая значимость

Результаты проведённых исследований предоставляют новую информацию о транспорте фотогенерированных 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.

На зависимостях фотонапряжения от мощности излучения были обнаружены критические значения P_c , после которых зависимости выходят на насыщение. Данные значения мощности могут рассматриваться как оптимальные для реализации ЛФЭ.

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.

Корреляции между магнитным упорядочением металлических плёнок и фотонапряжением, обнаруженные в исследуемых структурах, демонстрируют потенциал для использования фотовольтаического эффекта в устройствах спинtronики.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Спектральные зависимости латерального фотонапряжения в гибридных структурах с плоскими зонами качественно описываются решениями одномерных уравнений диффузии только при учёте зависимости глубины поглощения света в полупроводниковой подложке от длины волны.

2. Изменение энергии поверхностных состояний, локализованных на границе раздела диэлектрик/полупроводник, в магнитном поле приводит с существенному изменению латерального фотонапряжения (до 140%) при криогенных температурах.

3. Наличие ферромагнитных слоёв в гибридной структуре способствует возникновению низкополевых особенностей на полевых зависимостях латерального фотонапряжения.

Степень достоверности и апробация результатов

Образцы гибридныхnanoструктур, являющиеся предметом данной работы, получены при помощи современных технологий синтеза. Измерение транспортных свойств гибридных структур выполнено с использованием высокоточного измерительного оборудования. Полученные в ходе работы результаты не противоречат литературным данным и соответствуют современным физическим представлениям.

Основные результаты настоящей диссертационной работы докладывались на 6-ом Евразийском симпозиуме по магнетизму «Trends in MAGnetism» (EASTMAG), 2016 г., Красноярск; на Международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии», 2018 г., Иркутск; 7-ом Евразийском симпозиуме по магнетизму «Trends in MAGnetism» (EASTMAG), 2019 г., Екатеринбург; 8-ом Евразийском симпозиуме по магнетизму «Trends in MAGnetism» (EASTMAG), 2022 г., Казань; и на Самаркандином международном симпозиуме по магнетизму (SISM-2023), 2023 г., Самарканд, Узбекистан.

Личный вклад автора

Автор принял непосредственное участие в разработке методики исследования, проведении экспериментов, а также в обработке и интерпретации полученных данных. Концепция диссертационной работы и подготовка научных публикаций были реализованы совместно с научным руководителем и коллегами.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ [A1-A12], из которых 7 работ [A1, A2, A5, A6, A9, A10, A12] опубликованы в журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации составляет 119 страниц и включает 44 рисунка, 1 таблицу и 90 библиографических наименований.

Основное содержание работы

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность, сформулированы основные цели исследования. Обозначена научная новизна и практическая ценность работы, приводятся положения и результаты, выносимые автором на защиту.

Первая глава является литературным обзором, в котором рассмотрены основные виды фотоэффектов. Особое внимание уделено латеральному фотовольтаическому эффекту в гибридных структурах металл/диэлектрик/полупроводник. Приведён обзор научных работ, посвящённых влиянию различных элементов гибридных структур на латеральный фотовольтаический эффект [1-6]. Рассмотрены механизмы влияния магнитного поля на латеральный фотовольтаический эффект в гибридных структурах [7, 8].

Во второй главе описана технология подготовки образцов для исследования фотовольтаического эффекта в гибридных структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si. Подложка кремния была предварительно очищена химическим травлением и отжигом при температуре 400-650°C, после чего на ней был сформирован тонкий слой SiO₂ с толщиной 1.5 нм. Железные и марганцевые пленки были получены методом термического испарения в сверхвысоком вакууме при комнатной температуре. Толщины пленок контролировались с помощью лазерного эллипсометра, их значения составили 5 нм для Fe и 15 нм для Mn. Качество образцов оценивалось методом атомно-силовой и электронной микроскопии (рисунок 1). Анализ шероховатости показывает, что средняя шероховатость поверхности кремниевых подложек, покрытых естественным оксидом SiO₂, составляет 0.12 нм. Значение шероховатости поверхностей плёнок Fe и Mn, напылённых поверх слоя SiO₂ составляет около 0.5 нм.

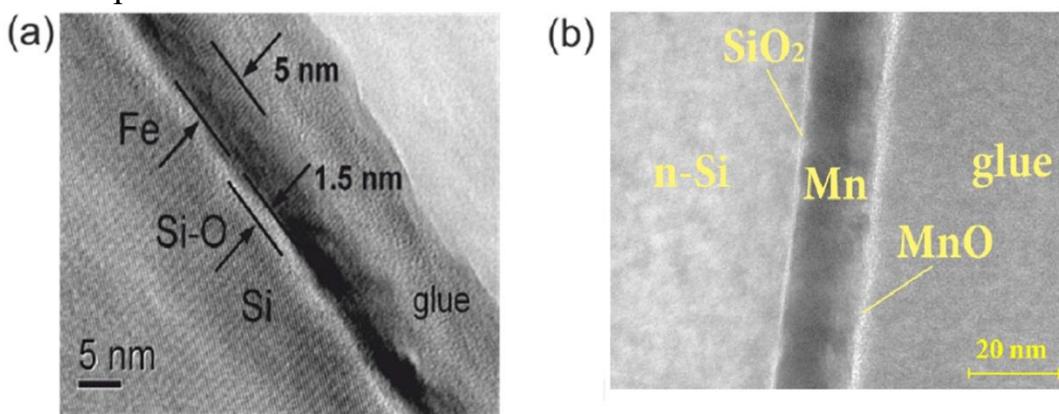


Рисунок 1. ПЭМ изображения поперечного сечения интерфейсов структур Fe/SiO₂/p-Si (а) и Mn/SiO₂/n-Si (б)

Также на одной из подложек n-Si был осажден тонкий слой марганца толщиной 1 нм, после чего при температуре 430°C при помощи метода термического испарения была осаждена пленка MnSi толщиной 25 нм.

Поверхность плёнки была покрыта защитным слоем аморфного кремния толщиной 8 нм. Полученная структура на основе силицида марганца использовалась для проверки предположения о наличии слабой ферромагнитной фазы в структуре Mn/SiO₂/n-Si, локализованной вблизи интерфейса SiO₂/n-Si.

Образцы для исследования ЛФЭ представляли из себя прямоугольники площадью (4.5×9) мм², вырезанные из подготовленных структур (рисунок 2). Две пары омических контактов, диаметром 0.5 мм были сформированы как на поверхности металлической плёнки, так и на нижней части подложки. Излучение было сфокусировано в узкой полосе (0.5 мм) на поверхности образца. Положение светового пучка было фиксировано асимметрично по отношению к положению контактов на весь период измерений. Магнитное поле прикладывалось в плоскости образца.

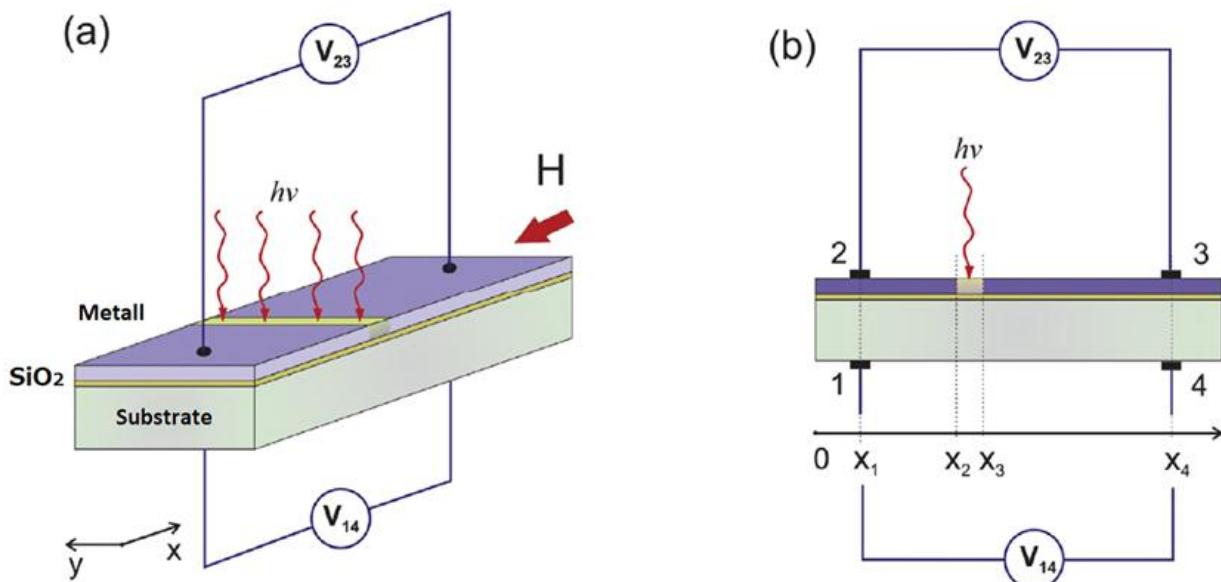


Рисунок 2. а) Экспериментальная геометрия исследования латерального (контакты 23 и 14) и поперечного (контакты 12 и 43) фотовольтаического эффекта. б) Система координат, используемая для анализа фотовольтаического эффекта

Для проведения исследований транспортных и магнитотранспортных свойств была использована установка, оборудованная гелиевым криостатом, обеспечивающим измерения в диапазоне температур от 4.2 К до 300 К. В качестве источников оптического излучения в экспериментах применялись полупроводниковые лазеры и галогеновая лампа с монохроматором. Установка укомплектована электромагнитом, позволяющим прикладывать внешнее магнитное поле до 1 Тл.

Для учёта термоэлектрических эффектов было выполнено сравнение температурных зависимостей темнового напряжения (в отсутствие облучения), а также напряжения при облучении светом с $P = 1.5$ мВт и $\lambda = 3$ мкм. При данном значении длины волны энергия фотонов ниже, чем ширина запрещенной зоны кремния, т.е. фотовольтаический эффект отсутствует, при этом излучение

нагревает образец, что позволяет выделить вклад в латеральное фотонапряжение от термоэлектрического эффекта. Различие напряжения без фотовольтаического эффекта, с нагревом образца лампой и без, составляет не более 0.5 мВ, что не оказывает существенного влияния на фотовольтаический эффект, значения которого для данного температурного диапазона составляют от единиц до сотен мВ. Также это позволило исключить эффекта Нернста-Эттингсгаузена при исследовании влияния магнитного поля на ЛФН.

Третья глава посвящена обсуждению результатов исследования латерального и поперечного фотовольтаического эффекта в гибридных структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si. Рассмотрены механизмы генерации фотовольтаических эффектов, отклик фотонапряжения на изменение таких параметров как магнитное поле, длина волны, температура и мощность излучения. Особое внимание уделено механизмам влияния магнитного поля на транспорт фотогенерированных носителей заряда.

Первый раздел посвящён обсуждению механизмов возникновения ЛФЭ, и экспериментальных зависимостей фотонапряжения в структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si от длины волны оптического излучения. В разделе разбирается общий механизм влияния магнитного поля на ЛФЭ и приводятся результаты моделирования латерального фотонапряжения (*LPV*) в структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si.

Механизм генерации латерального фотонапряжения в структуре Fe/SiO₂/p-Si с барьером Шоттки представлен на рисунке 3. Оптическое излучение, поглощенное в подложке p-Si, генерирует электронно-дырочные пары. Сгенерированные электроны и дырки разделяются электрическим полем в обеднённом слое (области пространственного заряда). Электроны дрейфуют в слой железа под влиянием поля Шоттки, в то время как дырки дрейфуют в объем подложки. Помимо поперечного дрейфа, фотогенерированные электроны и дырки диффундируют в латеральном (продольном) направлении, вследствие градиента концентраций носителей между освещённой и неосвещённой областями. В результате, возникает продольное распределение плотности носителей заряда, схематично изображённое на рисунке 3б.

Очевидно, что, если расстояния от электродов до освещаемой области различны, плотности носителей на электродах также будут отличаться. В результате между электродами возникает разность потенциалов (*LPV*).

Далее в разделе описывается исследование спектральных особенностей латерального фотонапряжения (*LPV*) в структуре Fe/SiO₂/p-Si в инфракрасном диапазоне. Приводится анализ зависимости *LPV* от длины волны излучения в отсутствие магнитного поля, а также в магнитном поле $H = 0.6$ Тл, при температуре 40 К (рисунок 4).

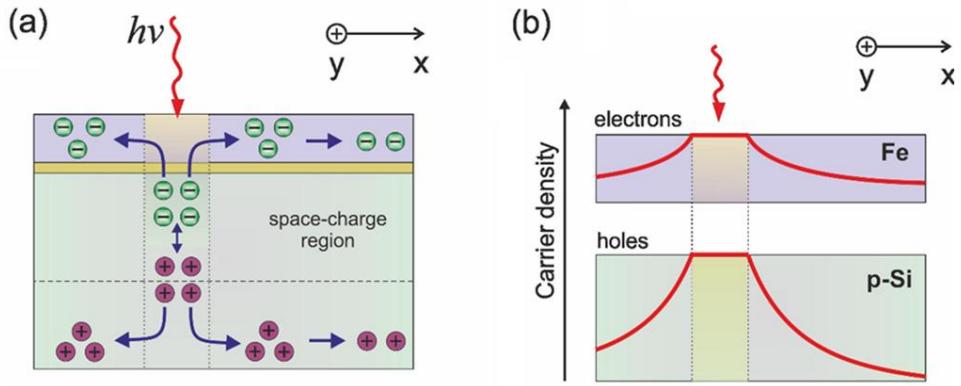


Рисунок 3. а) Возникновение латерального фотонапряжения в результате разделения электронно-дырочных пар и латеральной диффузии носителей. б) Схематическое изображение распределения плотности стационарных электронов и дырок на поверхностях Fe и Si

Экспериментальные данные показывают, что максимум LPV измеряемый со стороны кремниевой подложки наблюдается при $\lambda \approx 0.95$ мкм и при $\lambda \approx 1.0$ мкм при измерении со стороны Fe. Магнитное поле уменьшает амплитуду LPV без изменения положения максимумов.

На рисунке 2б приведены спектральные зависимости относительного изменения LPV в магнитном поле (MV), описываемого выражением:

$$MV = \frac{V(H) - V(0)}{V(0)} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $V(0)$ и $V(H)$ – напряжение в отсутствие магнитного поля и в поле H , соответственно. Величина MV достигает 40% в области 0.85–1.05 мкм, при этом кривые $MV(\lambda)$, измеренные со стороны Si и Fe имеют схожую форму.

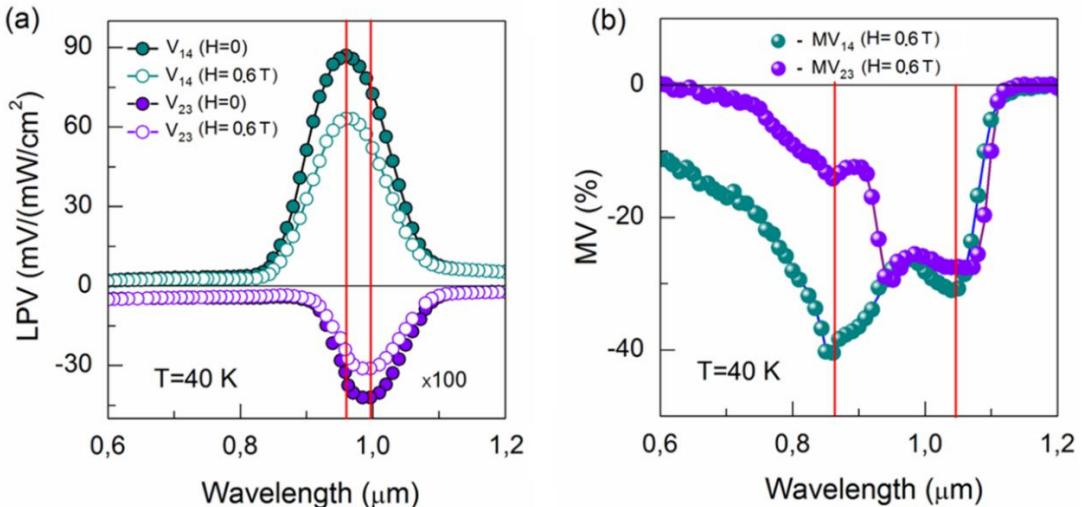


Рисунок 4. а) Латеральное фотонапряжение в структуре Fe/SiO₂/p-Si, измеренное со стороны поверхностей Si и Fe как функция длины волны ($V_{14}(\lambda)$ и $V_{23}(\lambda)$ соответственно); зависимости измерены в поле $H=0$ и $H= 0.6$ Тл и $T=40$ К. Для удобства зависимости $V_{23}(\lambda)$ были умножены на 100. б) MV как функция длины волны на поверхностях Fe и Si ($MV_{14}(\lambda)$ и $MV_{23}(\lambda)$, соответственно) при $H= 0.6$ Тл и $T=40$ К

Также изучено влияние температуры на спектральные зависимости LPV и MV (рисунок 5). При понижении температуры до 10 К наблюдается снижение величины LPV , с последующей сменой знака при 10 К, при этом значения MV отрицательны на всём диапазоне температур. Результаты демонстрируют влияние температуры и магнитного поля на фотовольтаический эффект.

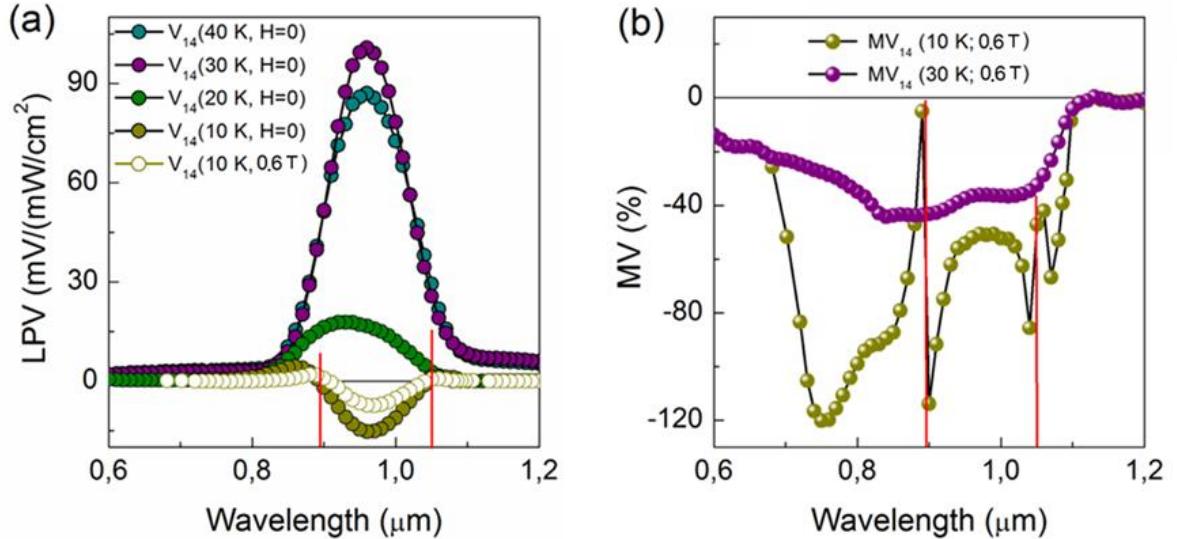


Рисунок 5 а) Латеральное фотонапряжение, измеренное на задней стороне подложки Si, как функция длины волны света при различных температурах. При $T = 10 \text{ K}$ показаны зависимости, полученные в полях $H = 0$ и $H = 0.6 \text{ Тл}$. б) MV как функция длины волны при температурах 10 и 30 К

Для лучшего понимания механизмов протекания фотовольтаического эффекта был проведён теоретический анализ латерального фотовольтаического эффекта в структуре Fe/SiO₂/p-Si. Для этого, распределения плотности электронов и дырок $n_m(x)$ и $p_s(x)$ в металле и полупроводнике, соответственно, были описаны согласно решению одномерного уравнения диффузии:

$$n_m(x) = n_i \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2}{(L_m)^2}\right) \quad \text{и} \quad p_s(x) = p_i \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2}{(L_s)^2}\right) \quad (2)$$

где x_i – положение границы освещенной зоны; n_i и p_i – плотности электронов и дырок в точке x_i соответственно; L_m и L_s - эффективные длины диффузии для электронов в металле и дырок в полупроводнике соответственно. Распределение носителей (2) позволяет определить распределение потенциала на верхней части плёнки Fe $\phi_m(x)$ и на задней стороне подложки Si $\phi_s(x)$:

$$\varphi_m(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{(S)} \frac{\rho_{em}(x')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' \quad \text{и} \quad \varphi_s(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_{(S)} \frac{\rho_{hs}(x')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' \quad (3)$$

где $\rho_{\text{em}}(x)$ и $\rho_{\text{hs}}(x)$ плотности заряда, создаваемые распределением электронов в Fe и дырок на дне подложки Si соответственно. Интегрирование производится по всей поверхности структуры S. Распределения $\phi_m(x)$ и $\phi_s(x)$, а также спектральное распределение разностей потенциалов $V_{14} = \phi_s(x_1) - \phi_s(x_4)$ и $V_{23} = \phi_m(x_2) - \phi_m(x_3)$, смоделированные в рамках предложенной модели, приведены на рисунке 6.

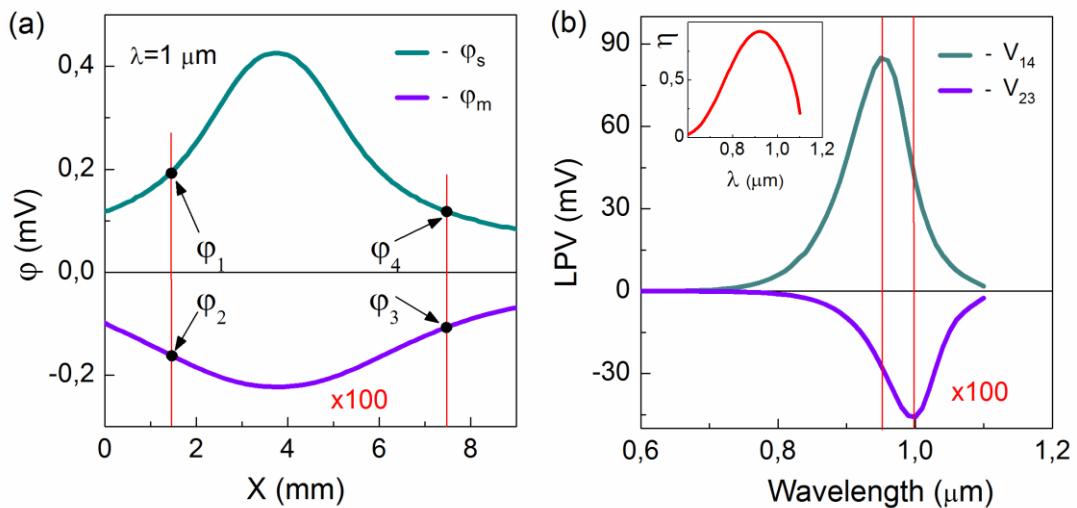


Рисунок 6. а) Распределение индуцированного оптическим излучением электрического потенциала на тыльной стороне подложки Si – ϕ_s и в пленке Fe – ϕ_m . Стрелки указывают потенциалы в области контактов. Для удобства $\phi_m(x)$ умножается на 100. (б) Смоделированное поперечное фотоэдс в зависимости от длины волны света на задней стороне подложки Si – $V_{14}(\lambda)$ и в пленке Fe – $V_{23}(\lambda)$ (умножено на 100). На вставке: квантовая эффективность как функция длины волны света

Результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными (рисунок 6), при предположении, что концентрации носителей n_i и p_i в освещенной области должны быть связаны не только с мощностью излучения, но и с квантовой эффективностью $\eta(\lambda)$, которая характеризует эффективность преобразования падающих фотонов с разными длинами волн в фотонапряжение. Разные знаки LPV в полупроводнике и металле объясняются разным типом основных носителей заряда (дырок и электронов соответственно). Разница между абсолютными значениями LPV , измеренными на сторонах Si и Fe, может быть обусловлена низкой концентрацией неравновесных электронов в металле ($n_i \ll p_i$).

Обсуждаемые выше экспериментальные зависимости LPV от длины волны показывают, что магнитное поле приводит к уменьшению фотонапряжения на всём исследуемом спектре. Влияние магнитного поля на LPV в данном случае обусловлено действием силы Лоренца. Здесь следует сосредоточить внимание на геометрии эксперимента, в которой направление магнитного поля в плоскости структуры исключает его влияние на траектории зарядов, движущихся в продольном направлении посредством диффузии. Влияние магнитного поля может

быть связано только с поперечным движением заряда. Фактически наблюдается аналог фотомагнитоэлектрического эффекта, открытого Кикоиным и Носковым в 1934 г. [9].

Для определения влияния составных элементов гибридной структуры на фотовольтаический эффект были также исследованы спектральные зависимости фотонапряжения в структуре Mn/SiO₂/n-Si (рисунок 7). Обнаружено, что спектры LPV в этой структуре существенно отличаются от аналогичных спектров для Fe/SiO₂/p-Si, что объясняется отличиями в зонной структуре образца (рисунок 7b). Высота барьера Шоттки в Mn/SiO₂/n-Si при приближении температуры к нулю стремится к значению 0.05 eV, что более чем на порядок ниже аналогичных значений для Fe/SiO₂/p-Si. Таким образом, дрейфовый вклад в фотонапряжение в структуре Mn/SiO₂/n-Si, обусловленный полем барьера Шоттки, становится пренебрежимо малым при $T < 40$ К. В этом случае основным механизмом возникновения фотонапряжения является диффузия фотогенерированных носителей.

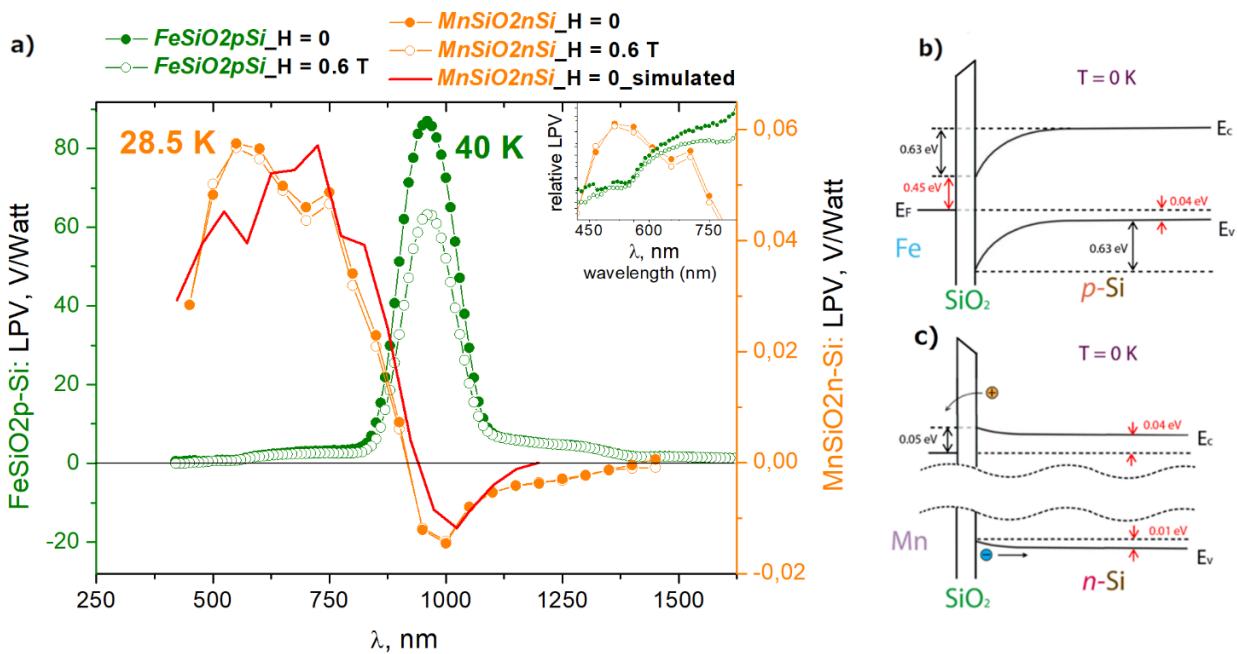


Рисунок 7. Спектральные зависимости LPV в структурах Fe/SiO₂/p-Si (зелёные кривые) и Mn/SiO₂/n-Si (оранжевые кривые) при $H = 0$ (заполненные круги) и $H = 0.6$ Тл (пустые круги).

Красная сплошная кривая – результат моделирования (а). На вставке к рисунку приведено сравнение формы сигнала в диапазоне коротких длин волн ($\lambda < 800$ нм). Схемы зонных диаграмм структуры Fe/SiO₂/p-Si (б) и Mn/SiO₂/n-Si (в) при $T = 0$ К

Выполнено моделирование фотовольтаического эффекта в структуре Mn/SiO₂/n-Si. Из-за описанных выше особенностей зонной структуры данного образца, описание фотовольтаического эффекта через одномерную латеральную диффузию носителей заряда, используемое для структуры Fe/SiO₂/p-Si оказывается неприменимым. Помимо прочего, данный подход не объясняет смену знака LPV

наблюдаемую при $\lambda > 800$ нм (рисунок 7а). Для качественного описания зависимостей $LPV(\lambda)$ в структуре Mn/SiO₂/n-Si было сделано предположение о том, что дрейфовый вклад в фотонапряжение пренебрежимо мал, что позволило не учитывать поперечное разделение фотогенерированных носителей заряда. Как следствие, фотонапряжение вызванное оптическим облучением с длиной волны λ детерминировано глубиной поглощения фотонов с данным значением λ в подложке. Движение носителей в поперечном направлении в этом случае описывается решениями уравнений диффузии:

$$n(x) = n_i e^{-\frac{(x-x_i)^2}{L_n^2}} \text{ и } p(x) = n_i e^{-\frac{(x-x_i)^2}{L_p^2}}, \quad (4)$$

где $n(x)$ и $p(x)$ — концентрации электронов и дырок, соответственно, зависящие от вертикальной координаты x , L_n и L_p — длины диффузии электронов и дырок, x_i — глубина поглощения фотонов в кремнии, определяемая длиной волны λ . На рисунке 8б показана спектральная зависимость поперечного градиента концентрации при разных значениях длин диффузии электронов и дырок, определяемая выражением:

$$\Delta[n(x) - p(x)] = [n(x = 350 \mu m) - p(x = 350 \mu m)] - [n(x = 0 \mu m) - p(x = 0 \mu m)]. \quad (5)$$

Смоделированные кривые демонстрируют ряд особенностей, таких как смена знака градиента концентраций, соответствующая смене знака LPV в структуре Mn/SiO₂/n-Si. Результаты также показывают существенное влияние длин диффузии носителей заряда на распределение концентраций.

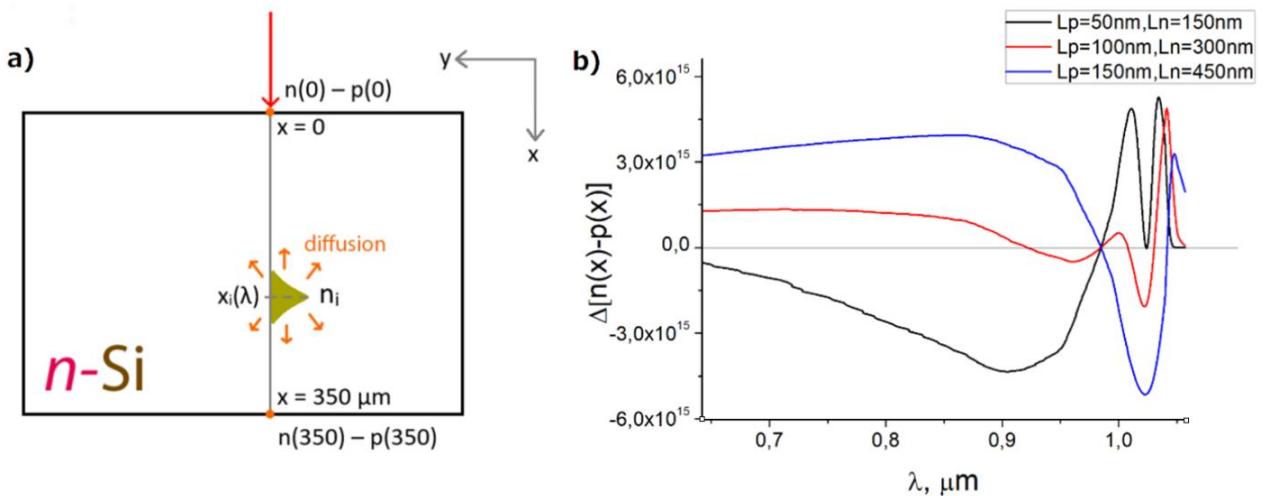


Рисунок 8. а) Схематическое изображение поглощения света в кремниевой подложке. б) Градиент концентрации носителей как функция длины волны для различных значений длин диффузии

Хорошее согласие с экспериментальными данными (рисунок 7а) было достигнуто при длинах диффузии $L_p = 100$ мкм и $L_n = 300$ мкм для дырок и

электронов соответственно. Для учёта спектрального распределения источника света, исходные значения $\Delta[n(x)-p(x)]$ были усреднены по каждому сегменту длины волны 50 нм. Таким образом, зависимости $LPV(\lambda)$ в структуре $Mn/SiO_2/n-Si$ со слабым полем Шоттки определяются спектральными зависимостями квантовой эффективности и глубины поглощения фотонов в кремнии [10, 11]. Эти результаты указывают на возможность качественного описания фотовольтаического эффекта в полупроводниках с омическими контактами путем регулировки таких параметров, как длины диффузии носителей и толщина подложки.

Второй раздел посвящён анализу комплексного влияния мощности излучения и магнитного поля на фотонапряжение. Обсуждается связь ЛФЭ с магнитным упорядочением в структурах $Fe/SiO_2/p-Si$ и $Mn/SiO_2/n-Si$.

Влияние магнитного поля на зависимости фотонапряжения от мощности излучения (P) для структуры $Mn/SiO_2/n-Si$ приведены на рисунке 9. Данные измерения выполнялись при $\lambda = 975$ нм и $T = 17$ К, при измерении фотонапряжения как в латеральном, так и в продольном направлениях. Зависимости демонстрируют рост фотонапряжения с ростом мощности и имеют тенденцию к насыщению при высоких значениях P . Фотонапряжение под действием внешнего магнитного поля снижается в обоих случаях, однако относительное изменение фотонапряжения различается в продольном и поперечном направлениях. Магнитное поле величиной 800 мТл снижает поперечное фотонапряжение (TPV) менее чем на 50% на всём диапазоне мощностей, тогда как латеральное фотонапряжение (LPV) снижается более чем на 90% при мощности больше 100 мВт.

Разница между значениями MV в продольном и поперечном направлениях объясняется тем, что в области низких температур в $Mn/SiO_2/n-Si$ неравновесные дырки движутся к плёнке, в то время как электроны уходят глубже в подложку кремния (рисунок 7c). В результате LPV определяется исключительно электронами в подложке, в то время как TPV генерируется как электронами на нижнем контакте, так и дырками со стороны плёнки. Дырки обладают меньшей подвижностью, чем электроны, а также проходят существенно меньшее расстояние до электрического контакта. Поэтому вклад дырок в фотонапряжение подвержен влиянию силы Лоренца существенно меньше, чем вклад электронов, что объясняет меньшее значение MV в поперечном направлении.

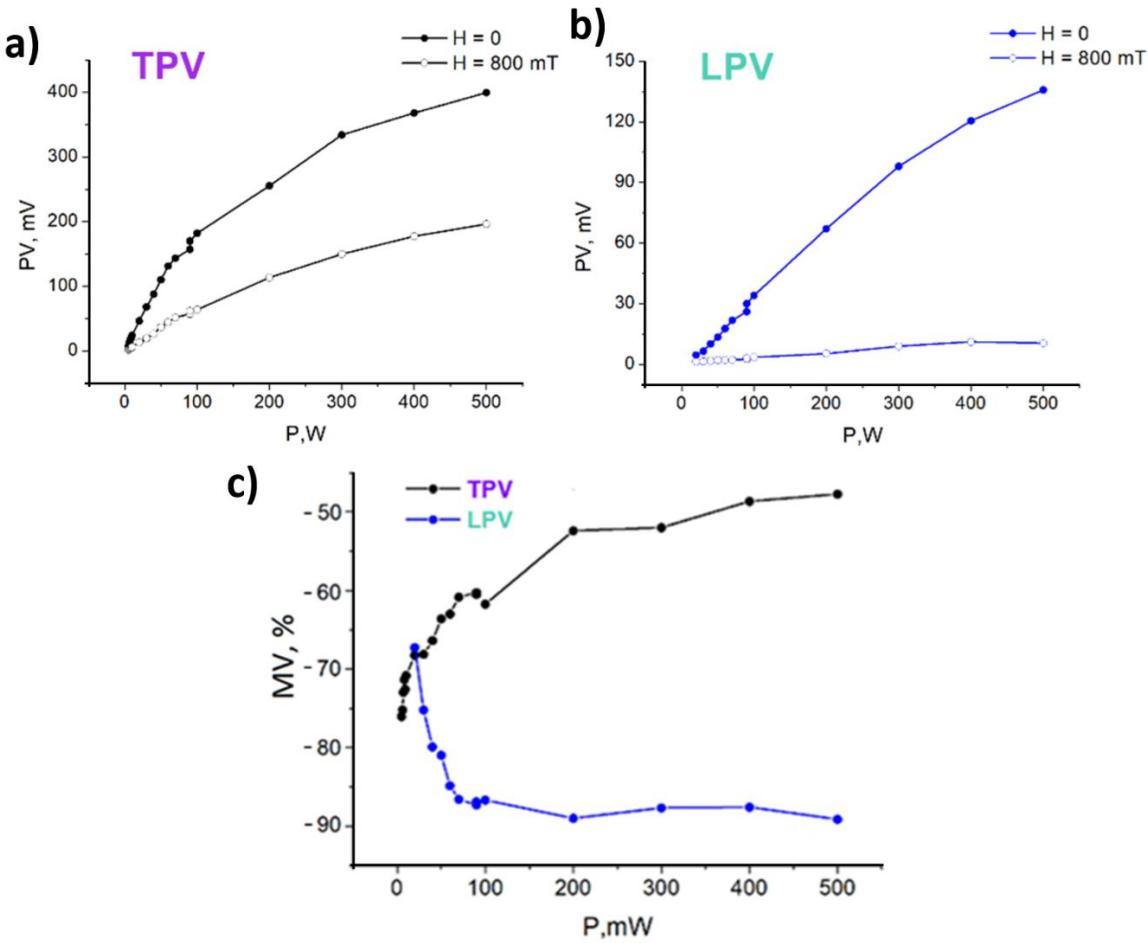


Рисунок 9. Зависимости фотонапряжения (PV) от мощности излучения в структуре $Mn/SiO_2/n-Si$ при $T = 17\text{K}$ и $\lambda = 975 \text{ нм}$, измеренные в поперечном направлении (а) и со стороны подложки (б). Зависимости MV от мощности излучения в продольном и поперечном направлениях (с)

На рисунке 10 представлены полевые зависимости LPV в структуре $Fe/SiO_2/p-Si$ при $\lambda = 668 \text{ нм}$, при разных значениях мощности излучения и температуры. При $T=10 \text{ K}$ характер зависимостей $PV(H)$ принципиально другой по сравнению с тем, что наблюдается при высоких температурах. Происходит смена знака LPV , и при достаточно больших значениях P действие магнитного поля приводит к увеличению абсолютного значения LPV . При малых значениях магнитного поля ($H < 0.1 \text{ Тл}$), видна явно выраженная асимметрия сигнала по отношению к знаку H . Причем характер асимметрии видоизменяется и даже усиливается с ростом P . Смена знака и увеличение величины LPV в магнитном поле, наиболее вероятно, связаны с деионизацией поверхностных/интерфейсных акцепторных состояний и увеличением их энергии в магнитном поле, соответственно, что приводит к изменению электрического потенциала в области пространственного заряда и, как следствие, к изменению диффузии и дрейфа носителей заряда. Асимметрия зависимости в больших полях $PV(H)$ математически может быть описана зависимостью $y=-x$, что характерно для холловского напряжения, поэтому логично предположить, что данный вклад обусловлен

действием силы Лоренца на носители, диффундирующие плоскости интерфейса ортогонально вектору магнитного поля. Хорошо прослеживаемая при большой P низкополевая особенность в виде двух пиков повторяет поведение магнитосопротивления в тонких ферромагнитных пленках. Предположительно, данная особенность обусловлена влиянием ферромагнитного упорядочения плёнки железа на фотовольтаический эффект.

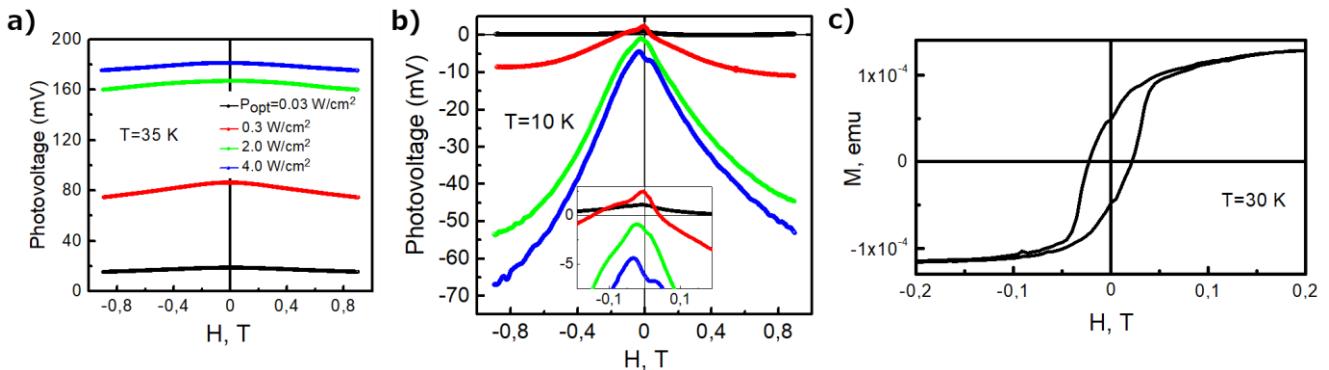


Рисунок 10. Полевые зависимости LPV при разных значениях P , при $T = 35\text{K}$, $\lambda = 668 \text{ нм}$ (а), и при $T = 10\text{K}$, $\lambda = 668 \text{ нм}$ (б) в структуре $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$. Петля гистерезиса структуры $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ при $T = 30\text{K}$ (с)

Схожий характер полевых зависимостей LPV наблюдается также и в структуре $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$. На рисунке 11 показана зависимость LPV от магнитного поля, измеренная при $T = 17 \text{ К}$. Наблюдаемые симметричные максимумы указывают на гистерезис с коэрцитивным полем $B_C \approx 20 \text{ мТл}$. Однако известно, что Mn не является ферромагнетиком. Подобный гистерезис наблюдался нами в плёнке MnSi , выращенной на кремнии (рисунок 11). Коэрцитивная сила аналогична той, что обнаружена в структуре $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$, что приводит нас к выводу, что фаза MnSi , вероятно, существует на интерфейсе $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$, где присутствуют фотогенерированные носители. В результате эти носители пересекают ферромагнитный слой, приводя к эффектам, напоминающим магнитосопротивление.

Полученные результаты указывают на то, что механизмы влияния магнитного поля на ЛФЭ в разных температурных диапазонах различны, и таким образом, не исчерпываются описанным ранее действием силы Лоренца на фотогенерированные неравновесные носители.

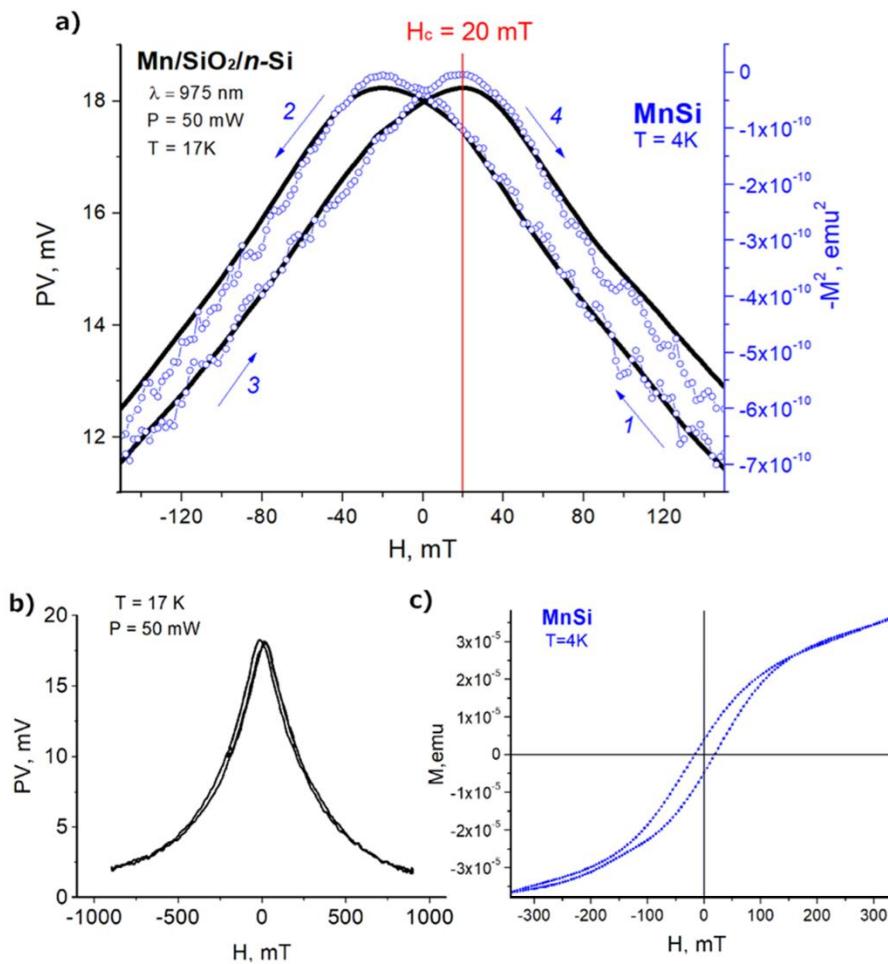


Рисунок 11. а) Чёрная кривая представляет зависимость LPV от магнитного поля в структуре $Mn/SiO_2/n\text{-Si}$ при $T = 17\text{ K}$ в диапазоне низких полей ($|H| < 150$ мТл). Синяя кривая показывает квадрат намагниченности как функцию магнитного поля в $MnSi/Si$ при $T = 4\text{ K}$. б) зависимость LPV от магнитного поля в структуре $Mn/SiO_2/n\text{-Si}$ при $T = 17\text{ K}$ в широком диапазоне полей ($|H| < 950$ мТл). в) Петля гистерезиса $MnSi/Si$ при $T = 4\text{ K}$

В третьем разделе обсуждаются температурные зависимости фотонапряжения. Приводятся данные, подтверждающие наличие поверхностных состояний в структурах $Fe/SiO_2/p\text{-Si}$ и $Mn/SiO_2/n\text{-Si}$, локализованных на границе раздела SiO_2/Si . Рассмотрены механизмы влияния поверхностных состояний на ЛФЭ, и на магнитный отклик фотонапряжения.

На температурных зависимостях LPV для структур $Fe/SiO_2/p\text{-Si}$ и $Mn/SiO_2/n\text{-Si}$ (рисунок 12) при $T \approx 20$ К наблюдаются максимумы фотонапряжения, при этом в случае со структурой $Mn/SiO_2/n\text{-Si}$, максимум выражен более ярко. Различие в форме температурных кривых между структурами $Fe/SiO_2/p\text{-Si}$ и $Mn/SiO_2/n\text{-Si}$ объясняется различными типами проводимости подложек и разной толщиной плёнок (5 нм для плёнки Fe и 15 нм для плёнки Mn). С дальнейшим понижением температуры ($T < 20$ K), снижается концентрация основных носителей, что приводит к расширению области пространственного заряда и, как следствие, к понижению градиента электрического поля Шоттки. Таким образом, снижается эффективность разделения электронно-дырочных пар и уменьшается значение LPV .

При температурах ниже 20 К из-за особенностей зонной структуры исследуемых образцов и вымерзания примесных центров, определяющим механизмом возникновения ЛФН становится диффузия фотоиндуцированных носителей заряда. А вследствие разной величины подвижности у электронов и дырок, при температуре ниже 15 К наблюдается смена знака LPV в структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si.

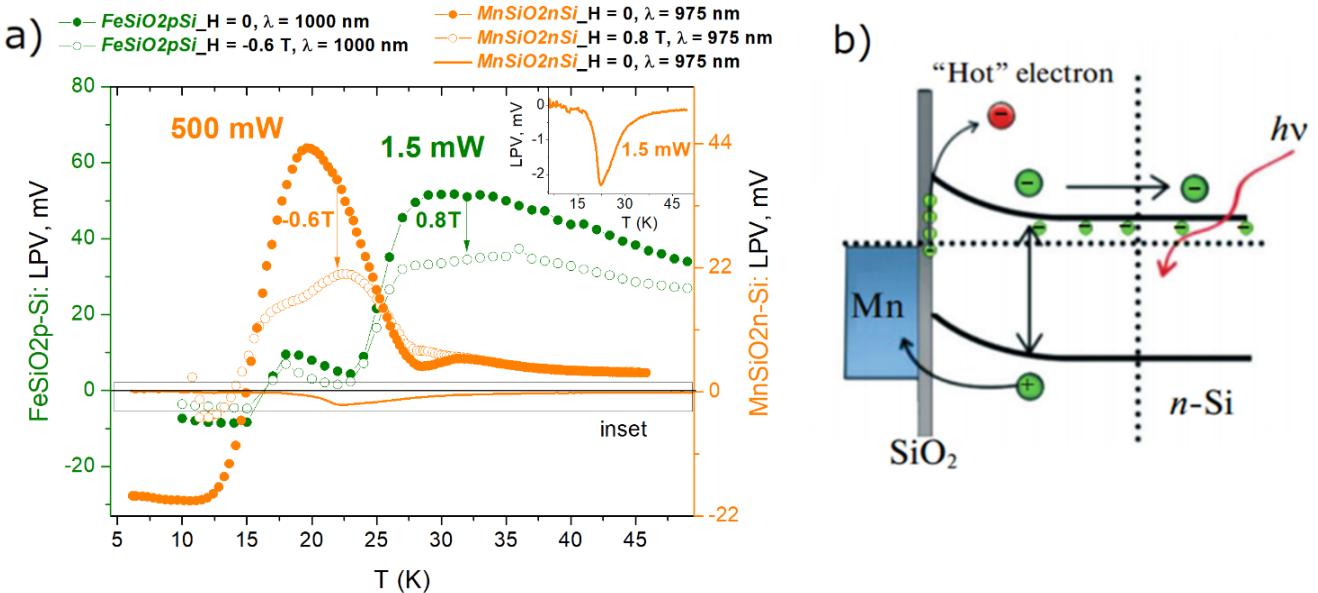


Рисунок 12. а) Температурные зависимости LPV в структурах Fe/SiO₂/p-Si (зелёная кривая) при $P = 1.5$ мВт и Mn/SiO₂/n-Si (оранжевая кривая) при $P = 500$ мВт в отсутствие поля $H = 0$ (заполненные круги) и во внешних полях (пустые круги). Вставка показывает кривую $LPV_{Mn}(T)$ при $P = 1.5$ мВт. б) Зонная диаграмма структуры Mn/SiO₂/n-Si при $T \approx 20$ К

Наличие упомянутых выше максимумов на температурных зависимостях фотонапряжения в структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si обусловлено присутствием поверхностных состояний, локализованных на интерфейсе SiO₂/Si. Наличие подобных состояний в структурах Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si, установлено методом импедансной спектроскопии [12,13]. На рисунке 13 приведены температурные зависимости действительной части импеданса, на которых были обнаружены максимумы, зависящие от частоты, свидетельствующие о термоактивационных процессах. При приложении небольшого переменного напряжения к МДП-структуре уровень Ферми начинает пересекать энергетические уровни поверхностных состояний, что вызывает процессы захвата/эмиссии носителей заряда данными состояниями. Температуры максимумов импеданса позволили вычислить значения энергий поверхностных состояний, которые составили $E_{Fe} = 43,2$ Эв и $E_{Mn} = 41,9$ Эв для структур Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si, соответственно. В магнитном поле данные значения энергии увеличиваются и составляют $E_{Fe}(H) = 43,6$ Эв и $E_{Mn}(H) = 42,1$ Эв.

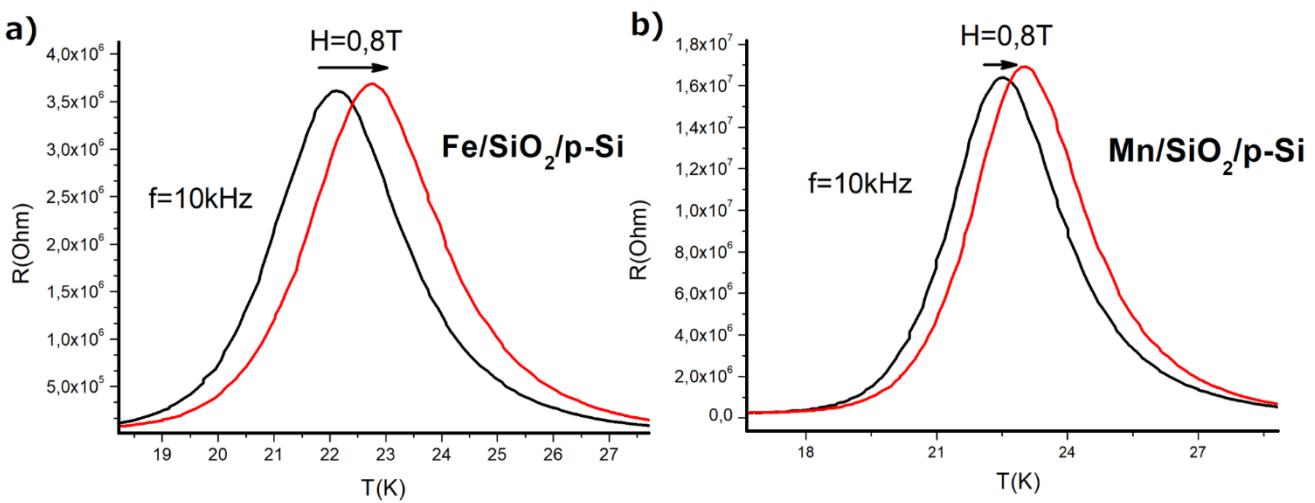


Рисунок 13. Температурные зависимости действительной части импеданса при $H = 0$ (чёрная линия) и $H = 0,8$ Тл (красная линия) в структурах $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ (а) и $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ (б)

На рисунке 12б приводится зонная диаграмма структуры $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ при $T \approx 20$ К в условиях оптического излучения. Уровень Ферми пересекает энергетические уровни поверхностных состояний, инициируя процессы захвата электронов из зоны проводимости. Дальнейшее поглощение света данными состояниями приводит к переносу захваченных электронов обратно в зону проводимости. Эти электроны принципиально отличаются от электронов, сформированных межзонным переходом, так как они обладают более высокой кинетической энергией и, следовательно, дрейфовой скоростью. Условно назовем такие электроны «горячими». Мы предполагаем, что «горячие» электроны обладают высокой скоростью диффузии и могут диффундировать в радиальных направлениях с минимальной рекомбинацией. Таким образом, поверхностные состояния вносят дополнительный вклад в фотонапряжение, который проявляется в возникновении обсуждаемых максимумов LPV .

Магнитное поле приводит к снижению амплитуды данных максимумов. Помимо действия силы Лоренца на траектории движения фотогенерированных носителей и их рекомбинацию, включение магнитного поля вызывает сдвиг положения уровней поверхностных состояний в сторону более высоких энергий. Данный механизм влияния поля на ЛФЭ демонстрирует дополнительные способы управления фотонапряжением в гибридной структуре, связанные с выбором интерфейса металл/диэлектрик.

В заключении сформулированы основные результаты исследования и выводы.

В работе приведены систематические исследования латерального и поперечного фотовольтаического эффекта в гибридных структурах $\text{Mn}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ и $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ в условиях варьирования различных параметров оптического облучения (длина волны, мощность) и температуры. Исследован отклик фотонапряжения на внешнее магнитное поле. Сделаны выводы о влиянии толщины плёнки и величины барьера Шоттки на фотовольтаические явления в гибридных

структурах. Описаны основные механизмы влияния магнитного поля на фотовольтаический эффект. Продемонстрирована существенная роль интерфейса диэлектрик/полупроводник в транспорте фотогенерированных неравновесных носителей заряда.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Спектральные характеристики фотонапряжения структур Fe/SiO₂/p-Si и Mn/SiO₂/n-Si в низкотемпературном диапазоне ($T < 40$ К) хорошо описываются решением одномерных уравнений диффузии для электронов и дырок. Низкая величина барьера Шоттки в структуре Mn/SiO₂/n-Si даёт основание не учитывать поперечный дрейф неравновесных носителей заряда при описании спектральных зависимостей фотонапряжения. Для качественного описания экспериментальных данных необходимо учитывать зависимость глубины поглощения фотонов в кремнии от длины волны.

2. Сила Лоренца является универсальным механизмом, ответственным за влияние магнитного поля на фотонапряжение в гибридных структурах, действующим во всем температурном диапазоне. Однако, в рамках данного механизма невозможно объяснить особенности на полевых зависимостях фотонапряжения, обнаруженные ниже температуры 40 К.

3. Установлено, что при низких температурах существенное влияние на фотовольтаический эффект оказывает магнитное состояние пленки. Наблюдается асимметрия полевых зависимостей латерального фотонапряжения в структуре Fe/SiO₂/p-Si, связанная с магнитным упорядочением плёнки Fe. На основе анализа полевых зависимостей латерального фотонапряжения выдвинуто предположение о наличии ферромагнитной фазы MnSi в структуре Mn/SiO₂/n-Si, сформированной на границе раздела SiO₂/n-Si, ответственной за наблюдаемые особенности на полевой зависимости латерального фотонапряжения.

4. На температурных зависимостях латерального и поперечного фотонапряжения, обнаружены максимумы, связанные с поверхностными состояниями, локализованными вблизи интерфейса SiO₂/Si. В области данных максимумов проявляется дополнительный механизм влияния магнитного поля на фотонапряжение вследствие смещения энергетических уровней поверхностных состояний под действием магнитного поля.

Список публикаций по теме диссертации

- [A1] Volkov, N. V. Magnetic field-driven lateral photovoltaic effect in the Fe/SiO₂/p-Si hybrid structure with the Schottky barrier / N. V. Volkov, M. V. Rautskii, A. S. Tarasov, I. A. Yakovlev, I. A. Bondarev, A. V. Lukyanenko, S. N. Varnakov, S. G. Ovchinnikov // Phys. E. – 2018. – Vol. 101. – P. 201–207.

- [A2] Volkov, N. V. Magneto-transport phenomena in metal/SiO₂/n(p)-Si hybrid structures / N. V. Volkov, A. S. Tarasov, M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, I. A. Bondarev, S. N. Varnakov, S. G. Ovchinnikov // J. Magn. Magn. Mater. – 2018. – Vol. 451. – P. 143–158.
- [A3] Bondarev, I. A. Magnetic field sensitive lateral photovoltaic effect in the Fe/SiO₂/p-Si hybrid structure / I. A. Bondarev, M. V. Rautskii, S. G. Ovchinnikov, N. V. Volkov // Eastmag 2016: Abstracts of the Conf. – 2016. – P. 239.
- [A4] Bondarev, I. A. The role of SiO₂/Si interface in magnetic field driven lateral photovoltaic effect in Mn/SiO₂/n-Si and Fe/SiO₂/p-Si MIS structures / I. A. Bondarev, M. V. Rautskii, N. V. Volkov, A. V. Lukyanenko, I. A. Yakovlev, S. N. Varnakov, A. S. Tarasov // SISM 2023: Abstracts of the Conf. – 2023.
- [A5] Bondarev, I. A. Lateral photovoltaic effect in silicon-based hybrid structures under external magnetic field / I. A. Bondarev, M. V. Rautskii, N. V. Volkov, A. V. Lukyanenko, I. A. Yakovlev, S. N. Varnakov, A. S. Tarasov // Mater. Sci. Semicond. Process. – 2023. – Vol. 167. – P. 107786.
- [A6] Bondarev, I. A. Magnetic field sensitive diffusion-driven photovoltaic effect in Mn/SiO₂/n-Si / I. A. Bondarev, M. V. Rautskii, N. V. Volkov, A. V. Lukyanenko, I. A. Yakovlev, S. N. Varnakov, A. S. Tarasov // Mater. Sci. Semicond. Process. – 2025. – Vol. 188. – P. 109237.
- [A7] Рауцкий, М. В. Магнитозависимый фотовольтаический эффект в гибридной структуре Mn/SiO₂/n-Si / М. В. Рауцкий, Л. В. Шанидзе, А. В. Лукьяненко, Д. А. Смоляков, И. А. Тарасов, С. Н. Варнаков, С. Г. Овчинников, И. А. Бондарев // Магнитные материалы. Новые технологии. – 2018. – Р. 112.
- [A8] Rautskii, M. V. Study of lateral photovoltaic effect in Mn/SiO₂/n-Si hybrid structure / M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, A. S. Tarasov, I. A. Tarasov, I. A. Yakovlev, S. N. Varnakov, S. G. Ovchinnikov, I. A. Bondarev // Eastmag 2019: Abstracts of the Conf. – 2019. – P. 105.
- [A9] Bondarev, I. A. Study of the photovoltage in Mn/SiO₂/n-Si MOS structure at cryogenic temperatures / I. A. Bondarev, M. V. Rautskii, I. A. Yakovlev, M. N. Volochaev, A. V. Lukyanenko, A. S. Tarasov, N. V. Volkov // Semiconductors. – 2019. – Vol. 53. – P. 1954–1958.
- [A10] Volkov, N. V. Magnetotransport phenomena and spin accumulation in MIS structures / N. V. Volkov, A. S. Tarasov, D. A. Smolyakov, A. O. Gustaitsev, M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, M. N. Volochaev, S. N. Varnakov, I. A. Yakovlev, S. G. Ovchinnikov // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1347. – №. 1. – C. 012006.
- [A11] Rautskii, M. V. Low temperature behaviour of the lateral photovoltaic effect in multilayered silicon-based nanostructures / M. V. Rautskii, L. V. Shanidze, A. V. Lukyanenko, A. S. Tarasov, I. A. Yakovlev, I. A. Bondarev // Eastmag 2022: Abstracts of the Conf. – 2022. – P. 446–447.

[A12] Smolyakov, D. A. Influence of metal magnetic state and metal-insulator-semiconductor structure composition on magnetoimpedance effect caused by interface states / D. A. Smolyakov, A. S. Tarasov, I. A. Yakovlev, A. N. Masyugin, M. N. Volochaev, I. A. Bondarev, N. N. Kosyrev, N. V. Volkov // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 671. – P. 18–21.

Список цитируемой литературы

- [1] Yu, C.Q. Giant lateral photovoltaic effect observed in TiO₂ dusted metal-semiconductor structure of Ti/TiO₂/Si / C.Q. Yu, H. Wang, Y.X. Xia // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95, № 14. – P. 141112.
- [2] Yu, C. Large lateral photovoltaic effect in metal-(oxide-) semiconductor structures / C. Yu, H. Wang // Sensors. – 2010. – Vol. 10, № 11. – P. 10155–10180.
- [3] Liu, S. Lateral photovoltaic effect and electron transport observed in Cr nano-film / S. Liu, X. Xie, H. Wang // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22, № 10. – P. 11627–11632.
- [4] Liu, S. Electric-induced nonvolatile enhancement of lateral photovoltaic effect observed in chromium nanofilm / S. Liu, X. Xie, C. Mei, Q. Hu, J. Wang, Q. Zhang, H. Wang // IEEE Electron Device Lett. – 2018. – Vol. 39, № 9. – P. 1393–1396.
- [5] Mei, C. Localized surface plasmon induced position-sensitive photodetection in silicon-nanowire-modified Ag/Si / C. Mei, S. Liu, X. Huang, Z. Gan, P. Zhou, H. Wang // Small. – 2017. – Vol. 13, № 41. – P. 1701726.
- [6] Mei, C. High sensitive position-dependent photodetection observed in Cu-covered Si nanopyramids / C. Mei, J. Zou, X. Huang, B. Zou, P. Zhou, Z. Gan, J. Hu, Q. Zhang, H. Wang // Nanotechnology. – 2018. – Vol. 29, № 20. – P. 205203.
- [7] Wang, S. Magnetic tuning of the photovoltaic effect in silicon-based Schottky junctions / S. Wang, W. Wang, L. Zou, X. Zhang, J. Cai, Z. Sun, B. Shen, J. Sun // Adv. Mater. – 2014. – Vol. 26, № 47. – P. 8059–8064.
- [8] Zhou, P. Size-dependent magnetic tuning of lateral photovoltaic effect in nonmagnetic Si-based Schottky junctions / P. Zhou, Z. Gan, X. Huang, C. Mei, Y. Xia, H. Wang // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 46377.
- [9] Kikoin I. K. A new photoelectric effect in cuprous oxide / I. K. Kikoin, M. M. Noskov // Phys. Z. Sowjetunion. – 1934. – Vol. 5. – P. 586–596.
- [10] Osterwald, C. R. Temperature-dependent spectral mismatch corrections / C. R. Osterwald, K. Emery, D. Albin, M. Deceglie // IEEE J. Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5, № 6. – P. 1692–1697.
- [11] Green, M. A. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K / M. A. Green, M. J. Keevers // Prog. Photovoltaics Res. Appl. – 1995. – Vol. 3, № 3. – P. 189–192.
- [12] Volkov, N. V. The bias-controlled giant magnetoimpedance effect caused by the interface states in a metal-insulator-semiconductor structure with the Schottky barrier / N. V. Volkov, A. S. Tarasov, D. A. Smolyakov, A. O. Gustaitsev, V. V. Balashev, V. V. Korobtsov // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol. 104, № 22. – P. 222406.

- [13] Volkov, N. V. Magnetotransport phenomena and spin accumulation in MIS structures / N. V. Volkov, A. S. Tarasov, D. A. Smolyakov, A. O. Gustaitsev, M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, M. N. Volochaev, S. N. Varnakov, I. A. Yakovlev, S. G. Ovchinnikov // AIP Adv. – 2017. – Vol. 7. – P. 015206.

Отпечатано в типографии Института физики им Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН. Тираж 80 экз. Заказ №5. Объём 1.4 усл. печ. л. Формат 60x84/16 660036, Красноярский край, г. Красноярск, Академгородок, д. 50 стр. 38