

Аннотация

Создание высокоэффективных источников и детекторов спин-поляризованных электронов являются важными научными и прикладными задачами с точки зрения физики твердого тела и физики ускорителей. В настоящее время фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением (spin-resolved ARPES) получила широкое распространение как передовой метод изучения электронной структуры поверхности твердого тела. В качестве спин-детектора в установках spin-resolved ARPES обычно используются приборы на основе спин-орбитального взаимодействия (детектор Мотта) или обменного взаимодействия (детекторы на основе спин-зависимого отражения электронов от поверхности ферромагнитной плёнки). Разработки спин-детектора с пространственным разрешением ведутся путём увеличения размерности одноканальных, что приводит к значительному усложнению конструкции и увеличению её габаритов. Таким образом, разработка спин-детектора, позволяющего эффективно детектировать спин электронов в многоканальном режиме (с пространственным разрешением) в ARPES измерениях, является актуальной задачей. Таким детектором может стать гетероструктура ферромагнетик–полупроводник. В данной гетероструктуре для измерения компоненты спина электрона, параллельной поверхности детектора, используется спин-зависимое прохождение электронов через ферромагнитную плёнку в полупроводниковую гетероструктуру. Интенсивность рекомбинационного излучения, зарегистрированная с обратной стороны структуры, зависит от относительной ориентации между спиновой поляризацией инжектированных электронов и намагниченностью слоя ферромагнетика. Для детектирования компоненты спина электрона, нормальной к поверхности детектора, используется измерение степени циркулярной поляризации рекомбинационного излучения инжектированных электронов.

Для физики ускорителей и спин-поляризованной электронной микроскопии актуальной задачей является разработка эффективных и долговечных источников спин-поляризованных электронов. Существующие источники спин-поляризованных электронов изготавливаются на основе материалов A^3B^5 . Для получения неполяризованных пучков электронов часто используют фотокатоды на основе антимонидов щелочных металлов. Данные фотокатоды позволяют получать пучки электронов с малым эмиттансом, при этом они проще в изготовлении, дешевле и менее восприимчивы к остаточной атмосфере вакуумной камеры, чем фотокатоды на основе A^3B^5 . Одним из наиболее распространённых материалов данной группы является Na_2KSb . Несмотря на сходство зонной структуры Na_2KSb и $GaAs$, данных по спиновой поляризации электронов из Na_2KSb фотокатодов не найдено. В связи с этим требуются исследования фотоэмиссионных свойств Na_2KSb фотокатодов.

В рамках выпускной квалификационной работы исследуются инжекционные свойства гетероструктуры для детектирования нормальной компоненты спина электрона, а также исследована возможность фотоэмиссии спин-поляризованных электронов из $Na_2KSb:Cs$ фотокатода.

Исполнитель (Ф.И.О): Русецкий Вадим Сергеевич

Наименование выпускной научно-квалификационной работы: Оптический метод регистрации спина свободных электронов с пространственным разрешением в гетероструктурах A^3B^5

Объект исследования: инжекция спин-поляризованных электронов в гетероструктуры A^3B^5 , фотоэмиссия спин-поляризованных электронов из GaAs/Cs-O и $Na_2KSb:Cs$ фотокатодов

Цель: изучение инжекционных свойств гетероструктур A^3B^5 для спин-детектора свободных электронов; исследование фотоэмиссионных свойств $Na_2KSb:Cs$ фотокатода.

Методы исследования: измерение спектров и пространственных распределений фото- и катодолюминесценции, измерение распределений фотоэлектронов по энергиям.

Научная новизна:

1. Экспериментально исследованы механизмы спиновой релаксации в гетероструктуре детектора (квантовые ямы GaAs/AlGaAs).
2. Продемонстрирована возможность многоканального детектирования спина свободных электронов с помощью разрабатываемого спин-детектора. Произведена оценка эффективности гетероструктуры спин-детектора. Показаны возможные пути её повышения.
3. Впервые обнаружен эффект оптической ориентации в $Na_2KSb:Cs$ фотокатоде. Предполагается, что благодаря зонной структуре, схожей с GaAs, для мультищелочного фотокатода правила отбора и максимальная степень спиновой поляризации аналогичны GaAs.
4. Экспериментально подтверждено, что фотокатод $Na_2KSb:Cs$ является источником спин-поляризованных электронов. Степень спиновой поляризации пучка электронов, фотоэмитированных из мультищелочного фотокатода оказалась равной около 40% при $T=300K$.
5. Уточнена зонная диаграмма для $Na_2KSb:Cs$ фотокатода. Экспериментально доказано, что $Na_2KSb:Cs$ – это фотокатод с эффективным отрицательным электронным средством.

Теоретическая и практическая значимость:

Полученные данные по гетероструктуре спин-детектора свободных электронов показывают перспективность разработки детекторов такого типа. Данные исследования позволят создать компактный спин-детектор, который может стать альтернативой существующим детекторам, используемым в установках фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением.

Обнаружение спин-поляризованной фотоэмиссии из $Na_2KSb:Cs$ открывает возможность создания более эффективных источников электронов для ускорителей, которые одновременно обладают малым эмиттансом, высокой степенью спиновой поляризации пучка и высокой долговечностью.

Область применения: методы спин-поляризованной электронной микроскопии, фотоэмиссионная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением (spin-resolved ARPES), источники электронов для ускорителей

Список ключевых слов: GaAs/Cs-O фотокатод, $Na_2KSb:Cs$ фотокатод, эффективное отрицательное электронное средство, фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением, вакуумный фотодиод, спин-детектор, фотолюминесценция, катодолюминесценция, распределение фотоэлектронов по энергиям

Апробация работы:

Основные результаты, полученные в рамках данной работы, представлялись и обсуждались на семинарах и конкурсах молодых учёных ИФП СО РАН, а также докладывались на следующих российских и международных конференциях: XIV Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2019" (Новосибирск, 2019), XXIII международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 2019), XXV международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 2021), Российская конференция и школа молодых учёных по актуальным проблемам полу-проводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных учёных) Фотоника (Новосибирск, 2021).

Публикации:

Статьи:

1. V.A. Golyashov, V.S. Rusetsky, T.S. Shamirzaev, D.V. Dmitriev, N.V. Kislykh, A.V. Mironov, V.V. Aksenov and O.E. Tereshchenko / Spectral detection of spin-polarized ultra low-energy electrons in semiconductor heterostructures/ Ultramicroscopy, Volume 218, November 2020, 113076, DOI:doi.org/10.1016/j.ultramic.2020.113076.
2. Tereshchenko, O. E., Golyashov, V. A., Rusetsky, V. S., Mironov, A. V., Demin, A. Y. & Aksenov, V. V./ A new imaging concept in spin polarimetry based on the spin-filter effect / J. Synchrotron Rad. 28 (2021), 864-875, DOI: doi.org/10.1107/S1600577521002307.
3. В. С. Русецкий, В. А. Голяшов, А. В. Миронов, А. Ю. Дёмин, О. Е. Терещенко. Фотоэмиссионные свойства мультищелочного фотокатода // Автометрия. 2021. Т.57, №5.

Тезисы и труды конференций:

4. В.С. Русецкий, В.А. Голяшов, Н.С. Назаров, И.Б. Чистохин, А.С. Ярошевич, Т.С. Шамирзаев, И.А. ДЕРЕБЕЗОВ, В.А. Гайслер, А.К. Бакаров, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, И.И. А.В. Миронов, В.В. Аксенов, О.Е. Терещенко / Фотоэмиссионные и инжекционные свойства полупроводниковых гетероструктур с эффективным отрицательным электронным средством // Материалы XXIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», 11-14 марта, Россия, Нижний Новгород, 2019, С. 813 –814
5. В. С. Русецкий, В. А. Голяшов, А. В. Миронов, В. В. Аксёнов, О.Е. Терещенко / Исследование фотоэмиссионных свойств мультищелочных фотокатодов // Тезисы докладов XIV Российской конференции по физике полупроводников 9-13 сентября 2019 г, Новосибирск, 2019, с. 4573.
6. В. С. Русецкий, В. А. Голяшов, А. В. Миронов, В. В. Аксёнов, А. Ю. Дёмин, О.Е. Терещенко / Фотоэмиссионные свойства мультищелочных фотокатодов // Материалы XXV международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», 9-12 марта, Россия, Нижний Новгород, 2021, С. 826 –827
7. В. С. Русецкий, В. А. Голяшов, А. В. Миронов, А. Ю. Дёмин, О.Е. Терещенко. Источник спин-поляризованных электронов на основе мультищелочного фотокатода. Фотоника 2021: Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых, С. 115, 2021