На правах рукописи

Русецкий Вадим Сергеевич

# Новый источник спин-поляризованных электронов на основе мультищелочного фотокатода

1.3.11- физика полупроводников

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Терещенко Олег Евгеньевич, профессор РАН, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией №3 физики и технологии гетероструктур, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1) Кооп Иван Александрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории 11, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

2) Петров Владимир Никифорович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Защита состоится «24» декабря 2024 г. в 16.30 на заседании диссертационного совета 24.1.134.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук:

Автореферат разослан « » 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность темы исследований

Исследование эмиссии и инжекции спин-поляризованных электронов в твердотельных структурах является важной областью спинтроники и активно изучается в последние десятилетия [1, 2]. В этом контексте разработка новых эффективных источников спин-поляризованных электронов [3, 4] и спиндетекторов для низкоэнергетических электронных пучков [5, 6] является актуальной задачей.

Результаты измерений спиновой поляризации электронов сыграли важную роль в понимании таких эффектов, как гигантское магнетосопротивление [7], Рашбы [8], а также в исследованиях топологических изоляторов [9]. Экспериментальные исследования, связанные с этими явлениями, основаны на измерениях зонной структуры поверхности твердого тела с учётом спиновой поляризации электронных состояний. Современным экспериментальным методом определения зонной структуры поверхности твёрдого тела является фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением (ФЭСУР со спиновым разрешением) [10]. В качестве спин-детектора в установках ФЭСУР со спиновым разрешением обычно используются приборы на основе спинорбитального взаимодействия (детектор Мотта) или обменного взаимодействия (детекторы на основе спин-зависимого отражения электронов от поверхности ферромагнитной плёнки). В большинстве случаев такие детекторы являются одноканальными, что означает их низкую эффективность. Разработки спиндетектора с пространственным разрешением ведутся путём увеличения числа одноканальных, что приводит к значительному усложнению конструкции и увеличению её габаритов. Таким образом, разработка компактного детектора, позволяющего измерять спиновую поляризацию электронов с высокой эффективностью, является важной задачей в современной фотоэлектронной спектроскопии.

Спин-поляризованные электронные пучки с высокой степенью поляризации требуются в установках для решения задач ядерной физики [11-14],

используются в электронной микроскопии для исследования также а намагниченности в материалах и наноструктурах [15]. Почти все современные источники спин-поляризованных электронных пучков для физики ускорителей и электронной микроскопии используют полупроводниковые фотокатоды на основе материалов  $A^3B^5$ , таких как GaAs (Cs, O) фотокатод с эффективным отрицательным электронным сродством (ОЭС). Несмотря на широкое использование GaAs (Cs, O) фотокатода, его серьезным недостатком является низкая устойчивость к остаточной атмосфере вакуумной камеры и, как следствие, малый срок службы [16]. Альтернативой фотокатодам А<sup>3</sup>В<sup>5</sup> являются материалы на основе антимонидов щелочных металлов, которые известны ещё с 1930-x используются электронно-оптических годов И широко В преобразователях, фотоэлектронных умножителях [17], а также для получения неполяризованных электронных пучков высокой яркости [13, 18]. Преимущество этих фотокатодов заключается в их более быстром временном отклике и большей долговечности по сравнению с фотокатодами A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>. Одним из наиболее распространённых антимонидов щелочных металлов является Na<sub>2</sub>KSb:Cs (мультищелочной фотокатод,  $M\Phi$ ). С помощью Na<sub>2</sub>KSb:Cs возможно получать электронные пучки с низким собственным эмиттансом (0.22 мм рад/(мм), что соответствует средней поперечной энергии (МТЕ) 30 мэВ при комнатной температуре) [19]. Благодаря этому фотокатоды на основе антимонидов щелочных металлов замещают A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> фотокатоды для получения неполяризованных пучков электронов [11]. Однако, возможность использования антимонидов щелочных металлов и, в частности, Na<sub>2</sub>KSb:Cs в качестве источников спин-поляризованных электронов ранее не изучалась.

# Цель и задачи работы

Целью работы является исследование фотоэмиссионных свойств Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода в качестве источника спин-поляризованных электронов и разработка полупроводникового спин-детектора с пространственным разрешением.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1) Изучить инжекцию свободных спин-поляризованных электронов в гетероструктуры А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>, установить механизмы спиновой релаксации электронов и эффективность разрабатываемого детектора.

2) Установить наличие эффекта оптической ориентации в Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатоде.

 Определить возможность спин-поляризованной фотоэмиссии из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода.

#### Научная новизна работы:

1. Продемонстрирована возможность многоканального детектирования спиновой поляризации свободных электронов с помощью полупроводникового спин-детектора на основе гетеростурктур A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>.

2. Впервые обнаружен эффект оптической ориентации в соединении Na<sub>2</sub>KSb. Получена высокая степень циркулярной поляризации фотолюминесценции, равная 23% при T=300 K, что близко к максимальному теоретическому значению 25%.

3. Впервые обнаружена фотоэмиссия спин-поляризованных электронов из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода. Измерена степень спиновой поляризации пучка электронов, эмитированных из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода: 40-50% при T=300 K.

 Впервые получены распределения фотоэлектронов, эмитированных из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода, по продольной энергии с высоким разрешением, ≈ 15 мэВ.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Обнаружение спинполяризованной фотоэмиссии из Na<sub>2</sub>KSb:Cs открывает возможность создания более эффективных источников электронов для ускорителей, которые обладают малым эмиттансом, высокой степенью спиновой поляризации пучка и долговечностью.

Полученные результаты по полупроводниковому детектору спина свободных электронов с пространственным разрешением показывают перспективность разработки детекторов такого типа. Данные исследования позволят создать компактный многоканальный спин-детектор на основе

гетероструктур A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>, который может стать альтернативой существующим одноканальным детекторам, используемым в установках фотоэмиссионной спектроскопии с разрешением по углу и спину.

Методология и методы исследования. В качестве основных объектов исследования в работе выступали мультищелочные фотокатоды (Na<sub>2</sub>KSb:Cs), выращенные на стекле и герметично закрепленные в плоскопараллельных вакуумных фотодиодах, анодом в которых являлись спин-детекторы на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs. Для уточнения зонной диаграммы исследуемого фотокатода измерялись спектры фотолюминесценции, квантового выхода и распределения фотоэлектронов по продольной составляющей кинетической энергии с использованием фотодиода как анализатора задерживающего потенциала. Для исследования спин-поляризованной фотоэмиссии из Na<sub>2</sub>KSb:Cs измерялись спектры И пространственные распределения циркулярно поляризованной катодолюминесценции В аноде при инжекции спинполяризованных электронов из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода. Хорошо изученный с точки зрения фотоэмиссии спин-поляризованных электронов GaAs(Cs,O) фотокатод использовался как для получения данных об эффективности спиндетектора, так и для сравнительных измерений с Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатодом.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. Гетероструктуры на основе соединений А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>р-типа, активированные до состояния эффективного отрицательного электронного сродства, могут быть использованы в качестве детектора спиновой поляризации свободных электронов с пространственным разрешением.

2. В соединении Na<sub>2</sub>KSb наблюдается эффект оптической ориентации. Максимальная степень циркулярной поляризации фотолюминесценции в Na<sub>2</sub>KSb достигает 23% при T=300 K, что близко к теоретическому значению 25%.

3. Мультищелочной фотокатод Na<sub>2</sub>KSb:Cs является источником спинполяризованных электронов. Степень спиновой поляризации пучка фотоэлектронов, эмитированных из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода достигает 40-50% при T = 300K.

Достоверность результатов и апробация работы. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается применением современных экспериментальных методов изготовления и исследования функциональных свойств образцов, высокой степенью воспроизводимости результатов. Полученные результаты и выводы не имеют противоречий с литературными данными.

Результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на семинарах и конкурсах научных работ ИФП СО РАН, а также докладывались на следующих российских и международных конференциях: XIV Российская конференция физике полупроводников «Полупроводники-2019» ПО 2019), XXIII международный симпозиум «Нанофизика и (Новосибирск, наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2019), XXV международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2021), Российская конференция И школа молодых учёных по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных учёных) Фотоника (Новосибирск, 2021).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах [A1 - A6], индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, и в виде 8 тезисов и материалов конференций.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач работы, а также обсуждение результатов осуществлялась автором диссертации совместно с научным руководителем. Изготовление образцов вакуумных фотодиодов с исследуемыми гетероструктурами производилось совместно с ЗАО «Экран ФЭП». Эксперименты по спектральным измерениям циркулярнополяризованной фото- и катодолюминесценции, измерение фотоэмиссионных характеристик исследуемых материалов, а также анализ экспериментальных Измерения пространственных данных проводились автором лично. распределений циркулярно-поляризованной катодолюминесценции проводились совместно с В. А. Голяшовым.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 112 наименований. Объем работы составляет 86 страниц. Работа содержит 1 таблицу и 34 рисунка.

# СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, её новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе рассмотрены полупроводниковые источники электронов, используемые в ускорителях частиц. Обсуждаются вопросы получения источников спин-поляризованных электронов с высоким квантовым выходом и степенью поляризации пучка. Приведены результаты по исследованию антимонидов щелочных металлов в качестве источников неполяризованных пучков электронов. Обсуждаются работы по расчёту зонной структуры соединения Na<sub>2</sub>KSb и возможность оптической ориентации в данном материале.

Приведён обзор существующих методов детектирования спина свободных электронов. Проведено сравнение основных параметров, используемых на данный момент спин-детекторов. Описана концепция многоканального спиндетектора, позволяющего определять спиновую поляризацию электронов в 3-х проекциях.

Во второй главе приведено описание плоскопараллельных вакуумных фотодиодов, содержащих исследуемые источник И детектор спинполяризованных электронов и позволяющих исследовать фотоэмиссионные и свойства инжекционные полупроводниковых гетероструктур. Описаны использованные в работе экспериментальные методы исследования и основные свойства полупроводникового спин-детектора свободных электронов.

В первой части главы приведено описание конструкции вакуумного фотодиода, метод генерации и детектирования спин-поляризованных электронов. Вакуумный фотодиод представляет собой цилиндрический корпус диаметром 30 мм, выполненный из алюмооксидной керамики, на торцах которого закреплены металлостеклянные узлы с исследуемыми фотокатодом и

анодом с узким (≈ 1 мм) зазором между ними (рисунок 1 (а)). Для получения спин-поляризованных электронов в исследуемых образцах используется явление оптической ориентации, суть которого заключается в передаче углового момента от фотона электрону при поглощении циркулярно-поляризованного света. Поляризация излучения при рекомбинации спин-поляризованных электронов также обусловлена передачей углового момента от электронов свету, поэтому по степени циркулярно поляризованной фотолюминесценции (ФЛ) можно судить о степени поляризации электронов, генерируемых в фотоэмиттере, а по степени поляризации катодолюминесценции (КЛ) — о степени поляризации электронов, инжектируемых из вакуума в анод-детектор. В данном случае под КЛ подразумевается излучение, генерируемое при рекомбинации электронов, инжектиронов, инжектирова в полупроводник.

Благодаря плоскопараллельному расположению катода и анода, в данном вакуумном фотодиоде есть возможность измерять не только вольт–амперные характеристики (рисунок 1(б)), но и продольную (вдоль нормали к поверхности



Рисунок 1. (а) Изображение вакуумного фотодиода в разрезе. (б) Вольт-амперная характеристика вакуумного фотодиода с двумя полупроводниковыми электродами: мультищелочной фотокатод и GaAs(Cs,O) фотокатод. Энергия фотонов 1.77 эВ, T = 300К. (в) Распределение электронов по продольной составляющей энергии мультищелочного фотокатода. Е<sub>vac</sub> – энергия, соответствующая уровню вакуума фотокатода, Е<sub>c</sub> – энергия дна зоны проводимости в объеме фотокатода. (г) Первая производная распределения. По ширине пика в производной в окрестности Е<sub>vac</sub> оценено разрешение по энергии в данном типе анализатора.

фотокатода) составляющую кинетической энергии фотоэлектронов (рисунок 1(в)), используя фотодиод как энергоанализатор задерживающего потенциала. Распределение фотоэлектронов по продольной составляющей кинетической энергии  $E_{lon}$  пропорционально производной от вольт-амперной характеристики по задерживающему потенциалу: N( $E_{lon}$ ) ~ dI(U)/dU [22]. Высокая однородность работы выхода катода и анода в исследуемых фотодиодах позволяет получать энергораспределения с высоким разрешением (рисунок 1 (в, г)). Для фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs энергораспределения с разрешением ≈15 мэВ получены впервые.

Вторая часть главы посвящена исследованию свойств полупроводникового спин-детектора с пространственным разрешением. Для этого использовался вакуумный фотодиод с GaAs фотокатодом и анодом – исследуемой гетеростурктурой-детектором. Анод представляет собой гетероструктуру p-GaAs/AlGaAs со слоями AlGaAs переменного состава и тремя GaAs квантовыми ямами, встроенными в матрицу AlGaAs. Поверхности как катода, так и анода активированы до состояния ОЭС путём нанесения Cs и O.

Рассмотрены процессы, определяющие степень поляризации КЛ и, как следствие, Процесс эффективность спин-детектора. движения спинполяризованных электронов в гетероструктуре-детекторе можно разделить на следующие этапы: (I) спин-поляризованные электроны инжектируются из вакуума в анод; (II) инжектированные электроны теряют свою кинетическую энергию при движении в матрице AlGaAs; и (III) электроны, захваченные в КЯ, движутся в плоскости КЯ. Степень поляризации КЛ Р<sub>кл</sub> может быть описана следующим уравнением:  $P_{KI} = S(E)P_0 = P_0k_1k_2k_3$ , где  $S(E) - \phi$ ункция Шермана, которая определяет связь между P<sub>KЛ</sub> и P<sub>0</sub> для электронов с кинетической энергией Е, *P*<sub>0</sub> - степень спиновой поляризации электронов, инжектированных из вакуума в анод;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  - коэффициенты деполяризации электронов на каждом из соответствующих этапов. Поскольку энергия инжектируемых в анод электронов мала (0-3 эВ), можно пренебречь эффектом спин-орбитального взаимодействия на границе вакуум/анод ( $k_1 = 1$ ). Коэффициент  $k_3$  не зависит от энергии инжектируемого электрона и равен  $k_3 = 0.5/(1+\tau_r/\tau_s)$ , где  $\tau_s$  и  $\tau_r$  - время

спиновой релаксации и время жизни электрона в КЯ. Для исследуемого анода коэффициент  $k_3$  был оценён из спектров степени поляризации  $\Phi \Pi$ :  $k_3 = 0.1$  при T=300 К и 0.08 при T=90 К [A2]. Коэффициент k<sub>2</sub> можно представить как k<sub>2</sub>  $=1/(1+\tau_{Mr}/\tau_{Ms})$ , где  $\tau_{Ms}$  и  $\tau_{Mr}$  - время спиновой релаксации и время жизни электронов, движущихся в матрице Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As анода до их захвата в КЯ. Максимальное теоретическое значение коэффициента  $k_2 = 1$  при гипотетическом отсутствии спиновой деполяризации электрона перед попаданием его в КЯ. В предположении, что  $\tau_{Mr}$  не зависит от E,  $k_2(E)$  однозначно определяется зависимостью  $\tau_{Ms}(E)$ . В свою очередь,  $\tau_{Ms}(E)$  может быть обратно пропорциональна E, E<sup>2</sup> и E<sup>3</sup> в случае механизмов спиновой релаксации Бира-Аронова-Пикуса (спиновая релаксация, обусловленная рассеянием электронов на дырках с переворотом спина из-за обменного взаимодействия между спинами электрона и дырки), Эллиота-Яфета (спиновая релаксация вследствие рассеяния электронов на колебаниях решетки или заряженных примесях) и Дьяконова-Переля (спиновая релаксация в нецентросимметричных кристаллах из-за спинового расщепления зоны проводимости) соответственно. Эти механизмы определяют деполяризацию электрона в полупроводнике р-типа [23]. Для того, чтобы выяснить преобладающий механизм спиновой релаксации, измерены зависимости степени поляризации КЛ от энергии инжектируемого электрона Ркл(Е) при температурах 90К и 300 К (рисунок 2) и аппроксимированы следующим выражением:

$$P_{\rm KJI} = \frac{k_3 P_0}{1 + \beta_i (E - E_c)^{\alpha_i}}, (1)$$

где  $E_c$  – энергия дна зоны проводимости  $Al_xGa_{1-x}As$ , а  $\beta_i$  - относительный вклад механизмов спиновой релаксации. Величина  $P_{KЛ}(E)$  достигает максимума в области низких энергий инжектируемых электронов 0.45-0.65 эВ (2 % и 3.5 % при 300 и 90 К, соответственно) и монотонно уменьшается до 0.1 % (определяется точностью измерений) для обеих температур при увеличении энергии электронов до 3 эВ. Значение а равно 2 при низкой температуре, поэтому спиновая релаксация электрона в аноде при движении в матрице AlGaAs

определяется механизмом Эллиотта-Яфета. Повышение температуры до 300 К уменьшает значение  $\alpha$  до 1.5. Следовательно, вклад механизма Бира-Аронова-Пикуса увеличивается с ростом температуры. Также можно сделать вывод, что асимметрия детектирования определяется, в основном, соотношением  $\tau_r/\tau_s$  в квантовой яме. Данное соотношение можно изменить с помощью изменения уровня легирования и ширины квантовой ямы.



Рисунок 2. Зависимость степени круговой поляризации КЛ от энергии инжектированных электронов при Т = 300 К (черные квадраты) и Т = 90 К (красные кружки). Энергия инжектированных электронов пропорциональна смещению между анодом и катодом. Линиями показаны энергетические зависимости степени поляризации КЛ для спиновой релаксации электронов, определяемой механизмами спиновой релаксации Эллиота-Яфета (ЭЯ), Бира-Аронова-Пикуса (БАП) и Дьяконова-Переля (ДП).

В третьей части главы определены основные параметры спин-детектора: функция Шермана S =  $P_{KЛ}/P_0$  (определяется как измеренная асимметрия для 100% - поляризованного электронного пучка) и эффективность (figure of merit, FOM) F =  $S^2N_{\phi}/N_e$ , где  $N_{\phi}/N_e$  в случае оптического детектирования - это число вышедших фотонов на один падающий электрон.

С учётом того, что средняя степень поляризации электронного пучка  $P_0$  составляет 20% (T=300 K) и 35-40% (T=90 K), на основе зависимости  $P_{\kappa n}(E)$  (рисунок 2) была определена функция Шермана для исследуемого детектора. Асимметрия степени поляризации КЛ достигает максимума S = 0.1 при минимальной энергии инжекции 0.5 эВ для обеих температур (максимально возможное значение S = 0.5).



Рисунок 3. (а) Функция Шермана S=P<sub>KЛ</sub>/P<sub>0</sub>, рассчитанная из зависимости асимметрии KЛ от энергии инжектированных электронов при T = 300 K (красные квадраты) и T = 90 K (синие кружки). (б) Зависимость интегральной интенсивности неполяризованной KЛ от энергии инжектированных электронов. На вставке показан фототок в зависимости от приложенного смещения. (в) Результирующая эффективность F =  $S^2N_{\phi}/N_e$  как функция энергии инжектированных электронов. Энергия инжектированных электронов пропорциональна смещению между анодом и катодом и элементарному заряду электрона.

Зависимость интенсивности КЛ в гетероструктуре AlGaAs/GaAs с КЯ от энергии электронного пучка, показана на рисунке 3(б). При обеих температурах интенсивность КЛ начинает значительно возрастать только при энергии электронов более 0.5 эВ, достаточной для преодоления поверхностного барьера мишени, инжекции в зону проводимости AlGaAs, захвата одной из КЯ с последующей излучательной рекомбинацией. Фототок близок к насыщению при  $U \approx 0.5 \text{ B}$  (рисунок 3(б) вставка), а сигнал КЛ продолжает резко увеличиваться с ростом энергии электронов вплоть до 1-1.5 эВ. При низких температурах эффективность эмиссии КЛ почти на порядок выше, чем при комнатной температуре, из-за более высокой вероятности излучательной рекомбинации. Из полученных зависимостей было вычислено значение квантовой эффективности  $N_{\phi}/N_{e}=10^{-4}$ . Зависимость FOM детектора в одноканальном режиме от энергии З(в). инжектируемого электрона показана на рисунке Эффективность увеличивается в диапазоне 0.5-0.8 эВ из-за увеличения квантового выхода КЛ и уменьшается с увеличением энергии выше 1.5 эВ из-за уменьшения S. Наибольшая и слабо зависящая от энергии FOM получена для диапазона кинетических энергий 0.8-1.5 эВ. Максимальные значения FOM равны 5х10<sup>-7</sup> при

300 К и 4х10-6 при 90 К.

Чтобы продемонстрировать способность полупроводниковой мишени детектировать спин-поляризованные электроны с пространственным разрешением, лва лазерных пучка противоположной циркулярной с поляризацией были одновременно направлены на фотокатод GaAs:Cs-O. Полученные два пучка электронов с противоположной спиновой поляризацией инжектируются в гетероструктуру-детектор, и формируют изображение КЛ Размер пятна изображения КЛ определяется (рисунок 4(a)). угловым распределением электронов, испускаемых фотокатодом GaAs:Cs-O. На рисунке полученное изображение КЛ содержит 4(в) видно, ЧТО два пятна с противоположной циркулярной поляризацией, связанной co спиновой поляризацией исходных пучков электронов. Измеренная асимметрия при энергии инжектируемых электронов 1 эВ составляет 1% и соответствует спектральным измерениям. Отметим, что рабочая область исследуемой мишени



Рисунок 4. (а) Изображение КЛ без учёта циркулярной поляризации, (б) разница интенсивности КЛ с противоположными направлениями циркулярной поляризации, (в) двумерное распределение степени циркулярной поляризации КЛ  $P_{KЛ} = (I\sigma + -I\sigma -)/(I\sigma + +I\sigma)$ . Изображения получены при ускоряющем напряжении 1 В и T = 300 К. В правой части рисунка изображены соответствующие профили интенсивности и степени поляризации КЛ вдоль линий  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ .

составляет 6 см<sup>2</sup>. При пространственном разрешении одного канала 10х10 мкм<sup>2</sup> можно получить более 10<sup>6</sup> каналов [АЗ].

**Третья** глава посвящена исследованию фотоэмиссионных свойств мультищелочного фотокатода (Na<sub>2</sub>KSb:Cs). Описываются полученные данные по ширине запрещённой зоны и величине электронного сродства в мультищелочном фотокатоде. Приводятся результаты исследования эффекта оптической ориентации в Na<sub>2</sub>KSb. Показана возможность фотоэмиссии спинполяризованных электронов из мультищелочного фотокатода.

Первая часть главы касается зонной диаграммы фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs. В настоящий момент в литературе имеются разночтения по поводу ширины запрещённой зоны и величине электронного сродства Na<sub>2</sub>KSb:Cs. Как работы по технологии роста, так и современные работы по расчёту зонной структуры и исследованиям Na<sub>2</sub>KSb:Cs в качестве источника электронов для ускорителей [13, 24] ссылаются на одну из первых работ по исследованиям фотоэмиссионных свойств антимонидов щелочных металлов [25], в которой по измерениям спектров фотопроводимости и квантового выхода сделан вывод, что ширина запрещённой зоны равняется 1 эВ, а элактронное сродство положительно и равно 0.3-0.4 эВ. Предположение о наличии ОЭС в Na<sub>2</sub>KSb:Cs было сделано лишь в нескольких работах [26, 27]. Для уточнения параметров исследуемых был изготовлен вакуумный фотодиод с фотокатодов двумя встречно включёнными Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатодами и исследованы спектры квантового выхода (рисунок 5 (а, б)) и неполяризованной ФЛ (рисунок 5 (в)). Из спектров ФЛ можно оценить ширину запрещенной зоны фотокатода: около 1.42 эВ при T=300 К и около 1.49 эВ при T=90 К, что согласуется с [26, 27]. Максимум спектра фотолюминесценции и порог фотоэмиссии (удобно отследить по максимуму производной квантового выхода по длине волны, рисунок 5 (б)) совпадают с точностью 5-8 мэВ и одинаково меняются с температурой. При этом величина квантового выхода при длинах волн вблизи максимума ФЛ (ширины запрещённой зоны) фотокатода остаётся достаточно высокой (6-10 %), что говорит о наличии эффективного отрицательного электронного сродства в

Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатоде. Далее из распределений фотоэлектронов по продольной составляющей энергии кинетической энергии (пример на рисунке 1 (в)) была оценена величина эффективного электронного сродства  $\chi = -140$  мэВ. Уточнённая зонная диаграмма для мультищелочного фотокатода представлена на рисунке 5 (г). Наличие эффективного отрицательного электронного сродства является одним из необходимых условий для получения источника спинполяризованных электронов на основе Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода.



Рисунок 5. (а) спектры квантового выхода мультищелочного фотокатода в диапазоне длин волн 780-950 нм при температуре 90 и 300 К; (б) первые производные спектров квантового выхода, (в) спектры фотолюминесценции фотокатода при температуре 90 и 300К при освещении лазерным излучением с длиной волны 405нм. (г) Зонная диаграмма Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода.  $E_{vac}$  – уровень вакуума,  $E_c$  – дно зоны проводимости,  $E_f$  – уровень Ферми,  $E_v$  – потолок валентной зоны. Ширина запрещённой зоны для соединения Cs<sub>3</sub>Sb была взята из [28].

Во второй части главы исследовались спектры циркулярно поляризованной  $\Phi Л$  в мультищелочном фотокатоде. На рисунке 6(а) представлены спектры циркулярно поляризованной  $\Phi Л$  в мультищелочном фотокатоде при освещении циркулярно поляризованным лазерным излучением с энергией фотона  $\hbar \omega = 1.49$  эВ (850 нм), на рисунке 6(б) представлен спектр степени поляризации  $\Phi Л$ . Сравнительные зависимости степени круговой поляризации  $\Phi Л$  в Na<sub>2</sub>KSb и GaAs от энергии падающих фотонов показана на рисунке 6(в). Сходство этих зависимостей, а также сходство зонной структуры Na<sub>2</sub>KSb и GaAs [24, A1] доказывает, что в Na<sub>2</sub>KSb наблюдается эффект оптической ориентации, и

позволяет предположить, что правила отбора для оптических переходов для Na<sub>2</sub>KSb и GaAs одинаковы (рисунок 6(г)). При этом степень поляризации ФЛ в Na<sub>2</sub>KSb даже при комнатной температуре оказалась равна 23%, что близко к предельному теоретическому значению в 25%. Важное различие зависимостей на рисунке 6(в) в том, что спад поляризации ФЛ в Na<sub>2</sub>KSb происходит при больших значениях энергии накачки, что связано с разницей в величине спинорбитального расщепления в Na<sub>2</sub>KSb GaAs (0.55 и 0.34 эВ соответственно). Также стоит отметить, что в Na<sub>2</sub>KSb степень поляризации ФЛ остается около 4 % при больших энергиях накачки ( $\geq$  2,4 эВ), а в GaAs близка к нулю.



Рисунок 6 (а) Циркулярно поляризованные ( $\sigma$ +,  $\sigma$ -) компоненты спектров ФЛ фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs при освещении циркулярно поляризованным светом с энергией фотонов 1.49 эВ. (б) Соответствующая спектральная зависимость степени циркулярной поляризации ФЛ: Р<sub>ФЛ</sub> = (I $\sigma$ + - I $\sigma$ - )/(I $\sigma$ + + I $\sigma$ - ). (в) Сравнительные зависимости степени циркулярной поляризации излучения ФЛ для Na<sub>2</sub>KSb и GaAs (толщина 0.5 мкм) как функция энергии накачки. (г) Схематичное изображение зонной структуры GaAs и Na<sub>2</sub>KSb в окрестности Г-точки, где E<sub>g</sub> – ширина запрещённой зоны,  $\Delta_{SO}$  – спин-орбитальное расщепление, CB – зона проводимости, НН и LH – подзоны тяжёлых и легких дырок. (д) Правила отбора для оптических переходов из валентной зоны в зону проводимости при поглощении света с правым направлением круговой поляризации ( $\sigma$ +). Числа в кружках – относительные вероятности переходов.

В третьей части главы изучалась фотоэмиссия спин-поляризованных электронов из мультищелочного фотокатода. Для эксперимента были изготовлены два вакуумных фотодиода, в качестве фотокатодов в которых использовались GaAs:Cs-O и Na<sub>2</sub>KSb:Cs, а в качестве спин-детектора использовалась гетероструктура с активным слоем Al<sub>0.11</sub>Ga<sub>0.89</sub>As толщиной 200 нм, изготовленная с учётом выводов, сделанных в главе 2. В обоих вакуумных фотодиодах поверхность Al<sub>0.11</sub>Ga<sub>0.89</sub>As активировалась до состояния эффективного отрицательного электронного сродства.



Рисунок 7. (а) Циркулярно поляризованные ( $\sigma$ +,  $\sigma$ -) компоненты спектров КЛ в гетероструктуре Al<sub>0.11</sub>Ga<sub>0.89</sub>As, полученных при инжекции спин-поляризованных электронов из фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs при ускоряющем напряжении 1.0 В, T = 300 К. (б) Степень циркулярной поляризации КЛ: P<sub>KЛ</sub> = (I $\sigma$ + - I $\sigma$ - )/(I $\sigma$ + + I $\sigma$ - ). (в) Сравнительные зависимости степени циркулярной поляризации КЛ от энергии инжектированных спин-поляризованных электронов из фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs и фотокатода GaAs:Cs-O. Энергия накачки фотокатодов равна 1.45 эВ.

Циркулярно поляризованные спектры КЛ, измеренные при T = 300 К при инжекции спин-поляризованных электронов из фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs с энергией 1.0 эВ, показаны на рисунке 7 (а). Максимум в спектре КЛ наблюдается при энергии фотонов 1.53 эВ, что совпадает с шириной запрещённой зоны Al<sub>0.11</sub>Ga<sub>0.89</sub>As. Степень круговой поляризации излучения КЛ равна 4 % (рисунок 7(б)). Зависимости степени круговой поляризации КЛ, полученные при инжекции спин-поляризованных электронов из фотокатодов Na<sub>2</sub>KSb:Cs и GaAs:Cs-O, от энергии инжектированных электронов в диапазоне 0.6-4 эВ показаны на рисунке 7 (в). Для Na<sub>2</sub>KSb:Cs максимальная степень поляризации КЛ равна 9.5 % при низких кинетических энергиях (0.6 эВ) и монотонно уменьшается до  $\approx$  1 % по мере увеличения энергии электронов до 4 эВ. Из рисунка 7(в) видно, что степень поляризации КЛ для Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода вдвое больше, чем для GaAs:Cs-O фотокатода. Учитывая, что поляризация фотоэлектронов от GaAs катода составляет 20-25 %, можно сделать вывод, что поляризация фотоэлектронов, эмитированных из Na<sub>2</sub>KSb:Cs равна 40-50 %.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы:

1. Показано, что гетероструктуры на основе полупроводниковых соединений А<sup>3</sup>В<sup>5</sup> р-типа с эффективным отрицательным электронным сродством могут быть использованы как детекторы спиновой поляризации свободных электронов с пространственным разрешением. Определены асимметрия и эффективность свободных детектирования поляризации электронов В зависимости от энергии инжектируемых электронов. Показано, что В одноканальном режиме эффективность детектирования равна 5х10<sup>-7</sup> при 300 К и 4х10<sup>-6</sup> при 90 К. В многоканальном режиме эффективность можно повысить до  $10^{6}$  paз.

2. Экспериментально доказано, что эффективное электронное сродство на поверхности мультищелочного фотокатода Na<sub>2</sub>KSb:Cs является отрицательным. Величина эффективного отрицательного электронного сродства в исследуемых образцах достигает -140 мэВ.

3. В соединении Na<sub>2</sub>KSb обнаружен эффект оптической ориентации электронов. Показано, что зонная структура вблизи центра зоны Бриллюэна и правила отбора для Na<sub>2</sub>KSb аналогичны GaAs. Достигнутая степень циркулярной поляризации фотолюминесценции в Na<sub>2</sub>KSb составила 23% при T=300K, что близко к предельному теоретическому значению 25%.

4. Na<sub>2</sub>KSb:Cs является эффективным источником спинполяризованных электронов. Степень спиновой поляризации пучка фотоэлектронов, эмитированных из Na<sub>2</sub>KSb:Cs фотокатода достигает 40-50% при T=300 K.

# Список публикаций по теме диссертации

A1. V. S. Rusetsky, V. A. Golyashov, S. V. Eremeev, D. A. Kustov, I. P. Rusinov, T. S. Shamirzaev, A. V. Mironov, A. Yu. Demin, and O. E. Tereshchenko / New Spin-Polarized Electron Source Based on Alkali Antimonide Photocathode/ Phys. Rev. Lett. 129 (2022), 166802, DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.166802

A2. 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 218 (2020), 113076, DOI:10.1016/j.ultramic.2020.113076.

A3. 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:10.1107/S1600577521002307.

А4. В. С. Русецкий, В. А. Голяшов, А. В. Миронов, А. Ю. Дёмин, О. Е. Терещенко. Фотоэмиссионные свойства мультищелочного фотокатода // Автометрия. 57 (5) (2021), 70-76.

A5. O. E. Tereshchenko, V. A. Golyashov, V. S. Rusetsky, D. A. Kustov, A. V. Mironov, A. Yu. Demin / Vacuum Spin LED: First Step towards Vacuum Semiconductor Spintronics / Nanomaterials 13(3), (2023), 422, DOI: 10.3390/nano13030422

A6. V. S. Rusetsky, V. A. Golyashov, D. A. Kustov, A. V. Mironov, A. Yu. Demin, and O. E. Tereshchenko / Photoemission and Injection Properties of Combined Multialkali and III-V NEA Photodiodes: Spin-polarized Source and Spin-detector / JPS Conf. Proc. 37 (2022), 021207, DOI: 10.7566/JPSCP.37.02120737

### Список цитируемой литературы

- 1. Introduction to Spintronics / S. Bandyopadhyay, M. Cahay. CRC Press, 2008.
- 2. Handbook of Spintronics / Y. Xu, D. D. Awschalom, J. Nitta. Springer, 2016.
- 3. Spin polarized electron sources / D. T. Pierce // Experimental Methods in the Physical Sciences / F.B. Dunning ed. . Academic Press, .
- Optimized photocathode for spin-polarized electron sources / Y. A. Mamaev, L. G. Gerchikov, Y. P. Yashin [et al.] // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. № 8. P. 81114.
- Low-energy cathodoluminescence experiment with polarized electrons and a negative-electron-affinity GaAs target / D. Göckel, G. Baum, B. Fromme [et al.] // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42. – P. 7242.
- 6. Polarized cathodoluminescence induced by low-energy spin-polarized electrons

injected in p-GaAs(Cs,O) / V. L. Alperovich, A. S. Terekhov, A. S. Jaroshevich [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. -2005. - Vol. 506.  $- N_{2} 3$ . - P. 302-307.

- 7. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M. N. Baibich,
  J. M. Broto, A. Fert [et al.] // Physical Review Letters. 1988. Vol. 61. № 21.
- Spin structure of the Shockley surface state on Au(111) / M. Hoesch, M. Muntwiler, V. N. Petrov [et al.] // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. - 2004. - Vol. 69. - № 24.
- Colloquium: Topological insulators / M. Z. Hasan, C. L. Kane // Reviews of Modern Physics. – 2010. – Vol. 82. – № 4.
- 10. Recent trends in spin-resolved photoelectron spectroscopy / T. Okuda // Journal of Physics: Condensed Matter. 2017. Vol. 29. № 48. P. 483001.
- Wang E, K. Aulenbacher // Proc. 59th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (ERL'17), Geneva, Switzerland, 2017. – Geneva, Switzerland : JACoW Publishing, 2018. – P. 77-78.
- The International Linear Collider / S. Michizono // Nature Reviews Physics. –
  2019. Vol. 1. № 4. P. 244-245.
- Advances in bright electron sources / P. Musumeci, J. Giner Navarro, J. B. Rosenzweig [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. Vol. 907. P. 209-220.
- 14. Project for a Super Charm-Tau Factory at BINP / P. Piminov // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. Vol. 15. № 7. P. 732-736.
- 15. Real Time Magnetic Imaging by Spin-Polarized Low Energy Electron Microscopy with Highly Spin-Polarized and High Brightness Electron Gun / M. Suzuki, M. Hashimoto, T. Yasue [et al.] // Applied Physics Express. 2010. Vol. 3. № 2. P. 26601.
- Vacuum Lifetime and Surface Charge Limit Investigations Concerning High Intensity Spin-polarized Photoinjectors / S. Friederich, K. Aulenbacher, C. Matejcek // Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19), Melbourne, Australia, 2019. – Geneva, Switzerland : JACoW Publishing, 2019. – P. 1954-1957.
- 17. The Photomultiplier Handbook. / A. Wright. Oxford University Press, 2017.
- Cathode R&D for future light sources / D. H. Dowell, I. Bazarov, B. Dunham [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. Vol. 622. № 3. P. 685-697.
- 19. Ultra low emittance electron beams from multi-alkali antimonide photocathode

operated with infrared light / L. Cultrera, C. Gulliford, A. Bartnik [et al.] // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 108. – № 13. – P. 134105.

- 20. Near atomically smooth alkali antimonide photocathode thin films / J. Feng, S. Karkare, J. Nasiatka [et al.] // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121. № 4. P. 44904.
- Single-Crystal Alkali Antimonide Photocathodes: High Efficiency in the Ultrathin Limit / C. T. Parzyck, A. Galdi, J. K. Nangoi [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2022. – Vol. 128. – № 11. – P. 114801.29.
- 22. Photoemission and Injection Properties of a Vacuum Photodiode with Two Negative-Electron-Affinity Semiconductor Electrodes / A. A. Rodionov, V. A. Golyashov, I. B. Chistokhin [et al.] // Phys. Rev. Applied. 2017. Vol. 8. № 3. P. 34026.
- 23. Optical Orientation / F. Meier, B. P. Zakharchenya. North Holland, 1984.
- 24. Electronic structure and optical properties of Na<sub>2</sub>KSb and NaK<sub>2</sub>Sb from firstprinciples many-body theory / R. Amador, H.-D. Saßnick, C. Cocchi // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021. – Vol. 33. – № 36. – P. 365502
- 25. Photoemissive, Photoconductive, and Optical Absorption Studies of Alkali-Antimony Compounds / W. E. Spicer // Physical Review. – 1958. – Vol. 112. – P. 114-122.
- 26. Оптическое поглощение и диффузионная длина электронов в мультищелочном фотокатоде / Бегучев В.П., Игнатова Н.К., Мусатов А.Л., Соловьева Е.К., Шефова И.А. // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35. – № 10. – С. 2155-2161.
- 27. Исследование распределения фотоэлектронов по энергиям из многощелочного фотокатода Na2KSbCsO / Бегучев В.П., Шефова И.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 8. С. 1595-1597.
- 28. Growth and stoichiometry of the CsxSb surface film of a high-efficiency, multialkali-antimonide photocathode / B. Erjavec // Thin Solid Films. 1997. Vol. 303. № 1-2. P. 4-16.