

Первый в мире мультищелочной источник спин-поляризованных электронов создали сибирские физики

Разработка может улучшить работу коллайдеров. Кроме того, результаты исследований представляют интерес для использования в электронной спектро- и микроскопии, а также для создания электронных устройств нового поколения

Ученые Института физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) в коллаборации с коллегами из других организаций создали новый стабильный источник спин-поляризованных электронов. Он превосходит традиционно используемые аналоги по совокупности параметров — времени жизни, квантовой эффективности и спиновой поляризации электронов. Источник — [мультищелочной фотокатод](#) — представляет собой тонкий полупроводниковый слой, который «производит» электроны с одинаковым спином (поляризованные) в ответ на облучение лазером.

Степень поляризации мультищелочного фотокатода — количество «вырабатываемых» спин-поляризованных электронов — составляет 50%. Исследователи рассчитывают повысить ее до ста процентов, модифицируя полупроводниковое соединение. Эксперты отмечают, что в случае достижения 60% степени поляризации, источник будет востребован на строящемся в Сарове коллайдере «Супер чарм-тау фабрика». Поляризация 50% означает, что у 75% электронов спин одинаков.

Подробности совместной работы специалистов ИФП СО РАН, ЗАО «Экран-ФЭП», Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», Новосибирского государственного университета, Томского государственного университета, Института физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН) опубликованы в [журнале Physical Review Letters](#). Исследование велось при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-20024) и Правительства Новосибирской области (р-9).

У электрона есть определяющие его характеристики: масса, заряд и спин. Компьютеры, телефоны, прочие гаджеты работают благодаря тому, что люди научились управлять движением электрона с помощью электрического поля, влияющего на заряд. Предполагается, что управление спином позволит создать спинтронные устройства — более быстрые и энергоэффективные.

Однако «производство» спинового тока, то есть спин-поляризованных электронов — непростая задача. А надежный источник (как и детектор) этих частиц нужен и для прикладных применений, и для фундаментальных исследований — при проведении экспериментов на ускорителях заряженных частиц — коллайдерах. Например, в России, в Сарове, на создаваемом электрон-позитронном коллайдере «Супер чарм-тау фабрике» или аналогичном — в Китае. Также поляризованные электроны востребованы и в самых крупных международных проектах — линейном коллайдере в Японии ILC (International

Linear Collider) с широким международным участием, китайском двухкольцевом коллайдере CEPC (The Circular Electron Positron Collider).

«Наше открытие в том, что мы установили: полупроводниковое соединение щелочных металлов и сурьмы — мультищелочной фотокатод — хороший источник спин-поляризованных электронов. Степень поляризации электронов у него может быть выше, чем у сложных гетероструктур на основе арсенида галлия (GaAs), которые обычно используются для таких целей. К тому же, у нашего источника дольше время жизни и больше квантовый выход — соотношение испущенных электронов к падающим фотонам, которые инициировали фототок. Мультищелочные фотокатоды изучались с 1930-х годов: они используются в фотоэлектронных умножителях, приборах ночного видения, а также в качестве источников электронов в ускорителях. Но никто не выяснял их потенциал как источника именно спин-поляризованных электронов», — объясняет **заведующий лабораторией физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН**, профессор НГУ, профессор РАН, доктор физико-математических наук **Олег Евгеньевич Терещенко**, руководивший работой по созданию источника.

По словам **главного научного сотрудника Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН** доктора физико-математических наук **Ивана Александровича Коопа**, до сих пор в экспериментах на циклических и линейных ускорителях применялись только арсенид-галлиевые источники.

«Мультищелочные катоды обещают быть менее требовательными к вакуумным условиям, к присутствию в остаточном газе нежелательных примесей. Если говорить о потенциальном использовании нового источника на “Супер чарм-тау” фабрике, нас вдохновляет большая величина квантового выхода мультищелочного фотокатода — аж до 15%. Это примерно на порядок выше, чем у гетероструктур на основе арсенида галлия. Но степень поляризации потребуется более 60%. Этот параметр более важен, чем квантовый выход — последний можно повысить, увеличивая мощность лазера или площадь фотокатода, а вот низкую степень поляризации ничем не восполнишь», — резюмирует Иван Кооп.

Олег Терещенко отмечает, что повысить степень поляризации источника на основе мультищелочного фотокатода можно до 100%, на это указывают недавние эксперименты.

«Мы будем дальше работать с полупроводниковой структурой, контролируемо менять ее свойства во время роста в вакуумной камере. Мы планируем сформировать полупроводниковую сверхрешетку, что, в перспективе, увеличит поляризацию до 100 %. Степень поляризации электронов будет измеряться в ростовой камере независимым спин-детектором Мотта», — добавляет ученый.

Большая величина квантового выхода источника может пригодиться и для получения поляризованных позитронов, которые нужны при детальном изучении процессов, происходящих при столкновении элементарных частиц.

«В Национальной лаборатории Джефферсона (JLAB) уже провели тестовые эксперименты с электронами, ускоренными до энергии 8 МэВ, которые “бросали” на вольфрамовую мишень, и убедились в почти 100% эффективности передачи поляризации от электронов к позитронам. Однако коэффициент такой конверсии электронов в позитроны очень мал (не более 0.01%), и поэтому важно иметь интенсивный источник поляризованных электронов. В этом случае у мультищелочного фотокатода, наверное, нет конкурентов», — поясняет Иван Кооп.

Дополнительную информацию о том, как начиналось исследование, как произошло открытие, о сотрудничестве ученых с высокотехнологичным предприятием, читайте ниже.

Как появилась гипотеза

Идея, что полупроводниковое соединение щелочных металлов и сурьмы может быть источником спин-поляризованных электронов, возникла у Олега Терещенко благодаря большому опыту работы с арсенид-галлиевыми фотокатодами. Ранее научная группа О.Е. Терещенко разработала [первый в мире полупроводниковый спин-детектор](#) на основе арсенид-галлиевого вакуумного спинового фотодиода. В новом исследовании ученые использовали детектор, чтобы проверить работу источника спин-поляризованных электронов. Измерения провел молодой научный сотрудник ИФП СО РАН, ученик О.Е. Терещенко кандидат наук Владимир Андреевич Голяшов — он измерил спиновую поляризацию с пространственным разрешением. Для мультищелочного фотокатода это было сделано впервые.

«Из литературы нам была известна электронная (зонная) структура полупроводникового кристалла антимонида щелочных металлов (KNa_2Sb), которая, на удивление, оказалась похожей на электронную структуру арсенида галлия. Я попросил наших коллег из ИФПМ СО РАН в Томске провести расчеты — численное моделирование зонной структуры KNa_2Sb , только с учетом спин-орбитального взаимодействия. Из полученных данных стало видно, что, с высокой вероятностью, полупроводниковый кристалл на основе соединения щелочных металлов и сурьмы, будет продуцировать спин-поляризованные электроны при облучении светом с круговой поляризацией. Проверить это предположение в эксперименте я попросил своего аспиранта Вадима Русецкого», — говорит Олег Терещенко.

«Самое сложное было поверить в то, что мы увидели»

Прежде всего, ученым нужно было провести предварительные тесты: *«Я измерил ключевой параметр — поляризованную фотолюминесценцию, и установил, способен ли кристалл KNa_2Sb испускать свет с круговой поляризацией. Это необходимое условие, если бы оно не выполнялось, мы бы*

дальше не работали с соединением. Поляризованная фотолюминесценция обнаружилась и оказалась неожиданно высокой — 23%! А чем больше ее величина, тем дольше и время жизни спин-поляризованных электронов — соответственно, больше их количество, которое можно зарегистрировать.

Честно говоря, самое сложное было сначала поверить в то, что мы увидели, а потом тщательно перепроверить, убедиться, что нет ошибки в измерениях», — рассказывает **Вадим Сергеевич Русецкий**, сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН, первый автор статьи в Physical Review Letters.

«Отзывы всех рецензентов статьи оказались положительными и даже поздравительными — такое бывает редко. Судя по вопросам, рецензенты были удивлены, как и мы, поскольку кто-то из экспертов считал мультищелочные соединения аморфными, кто-то — поликристаллическими, в которых не должно быть спин-поляризованной физики. А наши полупроводниковые соединения удалось вырастить монокристаллическими, и в них проявились нужные эффекты», — продолжает Олег Терещенко.

Совместная работа с предприятием

Следующий этап научной работы подразумевал создание источника спин-поляризованных электронов и определение его эффективности. Для этого исследователи, в коллаборации с ЗАО «Экран ФЭП», изготовили вакуумный фотодиод, у которого с одной стороны располагался мультищелочной полупроводниковый фотокатод KNa_2Sb , а с другой — полупроводниковый детектор спин-поляризованных электронов на основе арсенида галлия. Облучив фотокатод поляризованным светом, можно «извлечь» из него электроны с одинаковым спином, а детектор их регистрирует.

Все характеристики нового источника спин-поляризованных электронов на основе соединений сурьмы и щелочных металлов ученые сравнивали со «стандартом» — арсенид-галлиевым источником, на нем же проверялась и корректность работы оптической схемы.

«Мы убедились, что наша оптическая схема правильно отъюстирована, наши результаты коррелируют как с теоретическими расчетами, так и с измерениями характеристик для хорошо известного арсенид-галлиевого фотокатода», — заключает Вадим Русецкий, отвечавший за создание оптической схемы, измерения и их проверку.

«Все параметры нового источника измерялись “на воздухе” в созданном нами компактном приборе — вакуумном спиновом фотодиоде, который также может использоваться как “таблетированный” (небольшой) источник спин-поляризованных электронов непосредственно в фотоинжекторах современных коллайдеров», — подчеркивает Олег Терещенко.

Дальнейшую работу по усовершенствованию источника поляризованных электронов на основе мультищелочного фотокатода ученые ИФП СО РАН

продолжат, сотрудничая с коллегами из ЗАО «Экран ФЭП», ИЯФ СО РАН и специалистами других научных организаций.

Пресс-служба ИФП СО РАН
pressa@isp.nsc.ru, pressemiond@gmail.com, +79133736776

Иллюстрации по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/tussJDT7a1F41Q>

Авторы схемы Вадим Русецкий, Олег Терещенко, Автор фото В. Трифутин,

Подписи к фото:

1. Схематическое изображение вакуумного спинового фотодиода (он содержит мультищелочной источник спин-поляризованных электронов и их детектор). **Авторы изображения Вадим Русецкий, Олег Терещенко**
 - 1_1. Источник спин-поляризованных электронов (разработка научной группы О.Е. Терещенко, ИФП СО РАН)
 - 1_2. Источник спин-поляризованных электронов в оптической схеме
 - 1_3. Оптическая схема
2. Вадим Русецкий, Олег Терещенко, Владимир Голяшов (слева_направо)
 - 2_2. Вадим Русецкий, Олег Терещенко, Владимир Голяшов (слева направо)
 - 3_Олег Терещенко, заведующий лабораторией физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН, профессор НГУ, профессор РАН, доктор физико-математических наук
 - 3_1. Олег Терещенко
4. Вадим Русецкий, сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН.
 - 4_1. Вадим Русецкий
 - 4_2. Вадим Русецкий
5. Владимир Голяшов, кандидат физико-математических наук сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН.

Автор фото В. Трифутин