

Назад в будущее: первый в мире спиновый триод на основе наномембранного спин-детектора электронов сделали сибирские физики

Спин-детектор планируется установить на оборудовании станции СКИФ первой очереди

Создание спинового триода — значительный шаг к вакуумной спинтронике — направлению электроники будущего

Ученые Института физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) вместе с коллегами из других организаций сделали детектор спина электронов, используя своеобразный фильтр, в качестве которого выступает ферромагнитная пленка нанометровой толщины — наномембрана. Это первое в мире устройство, где детектирование спина электронов происходит с помощью их фильтрации через наномембрану с передачей изображения в поляризованных электронах.

Принцип действия похож на оптический поляризатор, которым многие пользуются, надевая поляризационные солнечные очки. По аналогии, если через ферромагнитную наномембрану пропустить неполяризованные электроны, то на выходе получим поляризованные. Исследователи добились мирового рекорда эффективности в детектировании спиновой поляризации электронов, с учетом пространственного разрешения. Для проверки эффективности спин-детектора был сделан — и тоже впервые в мире — спиновый триод или спинтрон.

Спин-детектор будет использоваться на установке фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР/ARPES) станции «Электронная структура» Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ). Купить спин-детектор за рубежом для СКИФ сейчас невозможно, да и устройств, сочетающих столь полный функционал (детектирование спина с пространственным разрешением), высокую эффективность, низкую стоимость и удобство использования, попросту не существует.

Кроме ФЭСУР (ARPES), спиновый анализатор сравнительно легко интегрировать, например, в электронные микроскопы, что позволит получать подробную информацию о магнитных свойствах твердых тел. А технология, созданная при разработке спинтрона, может дать толчок к развитию нового направления – вакуумной спинтронике.

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

Статье присвоен почетный статус «выбор редакции» из-за особой значимости, новаторского подхода и широкой востребованности. Редакция Physical Review Letters отмечает почетным статусом только одну из шести публикуемых статей, при этом лишь одна пятая всех поданных работ принимается к публикации.

«Это первый в мире спин-детектор с пространственным разрешением, в котором в качестве основного функционального элемента используется спин-фильтр — ферромагнитная наномембрана. Эффективность нового

устройства значительно выше, чем у существующих детекторов спина электронов. При этом не нужно разгонять исследуемые частицы до больших энергий, как это делается в самом известном спин-детекторе Мотта. Более того, наш прибор проводит измерения с пространственным разрешением, а значит способен собрать на несколько порядков больше данных в единицу времени. Его срок службы исчисляется годами (коммерческие устройства со схожим функционалом требуют замены через 1-2 недели), а оценочная стоимость на порядки ниже доступных на рынке спин-детекторов, даже не имеющих пространственного разрешения», — поясняет первый автор статьи, руководитель научной группы, заведующий лабораторией физики и технологии гетероструктур ИФП СО РАН, ведущий научный сотрудник ЦКП «СКИФ» профессор РАН Олег Евгеньевич Терещенко.

Мировой рекорд определения спиновой поляризации электронов

Спин – одна из характеристик электрона, как масса или заряд. Он может находиться в одном из двух состояний – либо «спин-вверх», либо «спин-вниз». Если в пучке у всех электронов спины направлены в одну сторону, то пучок считается 100% спин-поляризованным. Отдельная задача — создать пучок поляризованных электронов, этому была [посвящена более ранняя работа ученых](#). Столь же трудно эффективно определять поляризацию частиц — упрощенно говоря «посчитать», сколько электронов в пучке со спином вверх, сколько со спином вниз.

*«Мы впервые провели эксперименты по измерению характеристик двумерного спин-фильтра (ферромагнитной наномембраны) в режиме прямого изображения. **Получен мировой рекорд эффективности детектирования спиновой поляризации электронов с учетом пространственного разрешения.** Разработанный спин-детектор позволяет увеличить эффективность измерения спиновой поляризации в десять тысяч — миллион раз относительно одноканального спин-детектора Мотта. Это важный результат с точки зрения контроля и использования спин-поляризованных электронов и электронных пучков в разных спектроскопических и микроскопических методиках. Появляется возможность узнать больше об исследуемом материале, его магнитных свойствах, обнаруживая мельчайшие изменения в структуре или составе. В том, что касается микроскопии, спин-поляризация может использоваться для получения изображений с высоким разрешением и для изучения свойств отдельных атомов или молекул», —* продолжает Олег Терещенко.

Назад в будущее

Для проверки работы спин-детектора, а именно его ферромагнитной наномембраны, исследователи изготовили вакуумный спин-триод (спинтрон), аналог вакуумной лампы — триода.

«В вакуумной лампе есть управляющая сетка, которая “отпирает” и “запирает” электроны (разрешает или нет протекание тока). А в нашем приборе тоже своеобразная сетка — ферромагнитная нано-мембрана, но только с помощью неё мы управляем селекцией по спину. Пропускаем электроны

с определенным спином не по запирающему напряжению, а по магнитному моменту. На переключение по спину можно тратить меньше энергии, увеличить частоту работы электронных устройств, — а значит, и объемы передаваемой, хранимой, обрабатываемой информации. Спинтрон состоит из [источника спин-поляризованных электронов](#) на основе мультищелочного фотокатода, управляющего электрода — магнитной наномембраны, покрывающей каналы микроканальной пластины, и люминесцентного экрана в качестве детектируемого электрода», — добавляет ученый.

Направление «вакуумная микроэлектроника» возникло в 1980-х, в связи с появлением полупроводниковых устройств с вакуумным зазором. Это привело к выражению «*Back to the Future*» (назад в будущее). Почему «назад»? Предшественником современных транзисторов были вакуумные лампы. Хорошо известны их недостатки по сравнению с полупроводниковыми транзисторами — громоздкость и высокое энергопотребление. Но были и преимущества — простота конструкции, легкая замена отдельных элементов, радиационная стойкость. И что очень важно: вакуум — идеальный диэлектрик. А диэлектрик — один из ключевых элементов при изготовлении современного транзистора.

В 21 веке развитие нанотехнологий трансформирует вакуумную микроэлектронику в вакуумную наноэлектронику. Следующим логичным шагом будет развитие в сторону создания вакуумной спинтроники. Вакуумная спинтронная наноэлектроника может обеспечивать гораздо более высокие скорости переключения электронных устройств, меньшие потери энергии, устойчивость к радиации, широкий диапазон температур.

«В ходе исследования мы сделали первый шаг к созданию элементной базы вакуумной спинтроники, а уже созданный спиновый триод (спинтрон) можно отнести к классу приборов в этой сфере. По сути, вакуумная спинтроника — новое направление, которое наша группа начала развивать в мировом научном сообществе. Спинтрон — аналог вакуумной лампы с тем отличием, что в лампах прошлого века управление осуществлялось через заряд электрона, а созданный прибор управляется через воздействие на спин электрона», — комментирует О.Е. Терещенко

Вперед — на СКИФ

Ученые считают, что новый спин-детектор с пространственным разрешением должен стать самым эффективным и удобным (среди спин-детекторов) для исследователей и пользователей метода ФЭСУР (ARPES), особенно с использованием синхротронного излучения.

«Мы уже ведем работы по интегрированию наномембранного спин-детектора в нашу лабораторную установку фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, что позволит измерять распределение электронов по импульсу, энергии и трем компонентам спина. То есть получать полную информацию о законе дисперсии носителей заряда в кристаллах, что, в свою очередь, важно для поиска и исследования свойств новых полупроводников, сверхпроводников, 2D материалов, перспективных для электроники и спинтроники будущего.

*Мы продолжаем совершенствовать наш спин-детектор и уверены, что в полной мере он себя проявит на станции “Электронная структура” Сибирского кольцевого источника фотонов», — резюмирует **Олег Терещенко**.*

Фотографии здесь <https://disk.yandex.ru/d/Gwd41Xay9loLtg>

1. Будущее здесь. Спинтрон на первом плане.
2. Спинтрон отдельно
3. Спинтрон в сравнении с вакуумной лампой
4. Научная группа. Олег Терещенко, аспирантка ИФП СО РАН Анастасия Микаева, старший научный сотрудник кандидат наук Владимир Голяшов (слева направо)
5. Изображения в спин-поляризованных электронах, полученные с помощью спинтрона. Надпись «spin» была создана путем спиновой селекции поляризованных электронов со спином «вверх», в то время как надпись «1925» была создана электронами со спином «вниз». Надпись посвящена 100-летию открытия спина электрона.

Пресс-служба ИФП СО РАН

Контакты: Дмитриева Надежда Валерьевна,

пресс-секретарь ИФП СО РАН
pressa@isp.nsc.ru
89133736776