

Управляемый квантовый мир: физики создали перестраиваемый двумерный электростатический кристалл

Работа международной группы с участием сотрудников Института физики полупроводников (ИФП СО РАН) опубликована в [Nature Physics](#)

Физики из Австралии, России и Великобритании создали искусственный двумерный электростатический кристалл, электронные свойства которого можно непрерывно менять электрическим напряжением и магнитным полем. Настраиваемый искусственный кристалл сформирован внутри знакомой полупроводниковой структуры — слоя арсенида галлия в арсениде алюминия-галлия. Для этого ученые наложили на двумерный электронный газ (тончайший электронный слой) периодический электростатический рельеф. Меняя напряжения на двух затворах, исследователи смогли в одном и том же чипе перестраивать электронный спектр от «графеноподобного» к «кагоме-подобному», то есть получать разные типы энергетических зон без замены самого образца.

«Главное достижение состоит в том, что в одном и том же полупроводниковом устройстве можно электрически перестраивать искусственный кристалл и переходить от графеноподобных электронных состояний к кагоме-подобной плоской зоне, где на первый план выходят взаимодействия между электронами. Это уже не просто наблюдение отдельных минизон, а управляемая платформа для исследования коллективных квантовых состояний», — пояснил один из авторов работы, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН кандидат физико-математических наук **Виталий Ткаченко**.

В кагоме-подобной электронной системе главную роль играет кагоме-решётка. В такой решетке электроны могут почти «застывать» в так называемой плоской энергетической зоне, и тогда на первый план выходят взаимодействия между электронами, их коллективное поведение. Именно при определенном заполнении электронами плоской зоны учёные обнаружили новое коллективное состояние электронов — коррелированный изолятор, свойства которого не удавалось объяснить существующими моделями.

Созданная платформа позволяет моделировать квантовые системы, которые трудно или невозможно воспроизвести в природных материалах. Свойства нового искусственного кристалла можно не только спроектировать заранее, но и перестраивать непосредственно в процессе эксперимента. Работа опубликована в журнале [Nature Physics](#).

Исследование объединило изготовление и измерение образцов, одночастичное численное моделирование и многочастичную теорию. Образцы и транспортные измерения были сделаны в Университете Нового Южного Уэльса; полупроводниковые многослойные структуры арсенида галлия–алюминия галлия арсенида предоставила Кавендишская лаборатория. Сотрудники **Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН** кандидаты физико-математических наук Ольга и Виталий Ткаченко сопровождали эксперимент численными расчётами, оптимизировали дизайн трёхмерной полупроводниковой структуры. Многочастичную модель коррелированного состояния развили Олег Сушков и Зеб Крикс из Университета Нового Южного Уэльса.

«Есть и другие способы создания искусственных кристаллических решеток. Например, их можно “собирать” из атомно-тонких полупроводниковых слоёв, просто накладывая друг на друга как листы бумаги, но с небольшим поворотом. Из-за этого поворота образуется так называемый муаровый узор, как при наложении тюлевых занавесок – он и создает искусственную решетку. Другие исследователи берут за основу двумерный электронный газ, как в обсуждаемой работе, и с помощью травления создают в нем упорядоченно расположенные ямки нанометровых размеров.

Смысл этого направления исследований – усилить энергию взаимодействия электронов друг с другом по сравнению с их кинетической энергией, чтобы создать условия для изучения эффектов коллективного поведения электронов.

Обсуждаемая работа выгодно отличается большей управляемостью искусственного двумерного кристалла с помощью изменения напряжений, прикладываемых к двум металлическим затворам. Этого удалось достичь, объединив

усилия по разработке дизайна структур с помощью компьютерного моделирования (ИФП СО РАН, Новосибирск), созданию двумерного электронного газа высочайшего качества (Кавендишская лаборатория, Кембридж) и изготовлению образцов искусственного кристалла (Университет Нового Южного Уэльса)», — комментирует коллега авторов статьи, старший научный сотрудник ИФП СО РАН кандидат физико-математических наук **Алексей Ненашев**, специалист в области моделирования квантовых явлений в низкоразмерных материалах.

Пресс-служба ИФП СО РАН

Иллюстрации по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/9nhOubuTxVsURg>

1. Схема устройства, показывающая расположение затворов/ Фото из статьи в [Nature Physics](#) (с переводом обозначений на русский)

1_1. Изображение схемы устройства, сгенерированное нейросетью

2. Виталий Ткаченко, автор фото Владимир Трифутин

Больше подробностей и пояснений можете прочитать ниже:

Электростатический кристалл вместо обычного

Свойства твёрдых тел определяются тем, как расположены атомы и как взаимодействуют электроны. Так возникает сверхпроводимость, магнетизм и другие необычные квантовые эффекты. Однако в природных материалах параметры кристалла изменить практически невозможно, поскольку они установлены атомной решёткой, заданной химическим составом и кристаллической структурой материала.

В новом устройстве дополнительную периодическую решётку создаёт электрическое поле: для электронов формируется искусственный пространственно-периодический потенциал, геометрия и амплитуда которого задаются конструкцией устройства и приложенными напряжениями.

В обычном кристалле электроны движутся в поле атомов, расположенных в строго определенном порядке. А в новом искусственном кристалле над тонким слоем электронов создали периодический электрический рельеф: электрон «ощущает» ограничения, заданные электрическим потенциалом и начинает вести себя так, будто находится в кристалле с заданной геометрией. Причем эту геометрию можно перестраивать «на лету», меняя управляющее напряжение.

В многослойной полупроводниковой структуре из арсенида галлия – арсенида алюминия-галлия авторы работы сформировали двумерный электронный газ — тончайший слой, где электроны могут свободно двигаться, но только в одной плоскости. Всего в 25 нанометрах над двумерным электронным газом расположили металлический затвор (электрод) с регулярной треугольной сеткой отверстий. Период этой сетки — 100 нанометров, то есть в сотни раз больше расстояний между атомами в обычном кристалле.

Выше, отделенный диэлектриком, — еще один металлический затвор, который позволял менять силу периодического электрического поля. Первый затвор в основном задавал плотность электронов в двумерном электронном газе, второй — насколько сильно они «чувствуют» искусственную решетку. Меняя напряжение, прикладываемое к первому затвору, можно притягивать электроны к искусственному кристаллу или, наоборот, отталкивать их, тем самым управляя количеством электронов. Чем больше электронов в кристалле — тем больше энергетических зон заполнено ими. А сквозь отверстия в первом затворе проникают силовые линии электрического поля от второго затвора и выталкивают электроны из-под отверстий, иначе говоря — формируют потенциальный рельеф для электронов с «вершинами» под отверстиями и «ямами» между ними. Высота этого рельефа, задающего двумерный искусственный кристалл, управляется напряжением, приложенным ко второму затвору.

Перестраиваем свойства кристалла «на лету»

Управляя электростатическим потенциалом, ученые обнаружили, что при слабом потенциале электроны ведут себя почти как свободные частицы. По мере увеличения потенциала, начинают формироваться новые энергетические зоны (минизоны). Энергетические зоны — набор значений энергий, которой могут обладать электроны.

Сначала, при увеличении потенциала, возникает структура, аналогичная графену. В ней появляются так называемые дираковские конусы — особые точки, где электроны начинают вести себя как почти безмассовые частицы. При дальнейшем увеличении система перестраивается ещё сильнее и превращается в электронный аналог кагоме-решётки. Название происходит от традиционного японского орнамента, образующего сеть треугольников и шестиугольников. Именно такая геометрия давно интересует физиков, поскольку в ней могут возникать необычные коллективные квантовые состояния.

Самым важным результатом работы стало формирование так называемой плоской энергетической зоны: обычно энергия электронов сильно зависит от их импульса. В плоской зоне эта зависимость практически исчезает. Дело в том, что в квантовой механике электрон распространяется как волна, а кагоме-решетка устроена так, что электронные волны от соседних узлов решетки гасят друг друга — в результате движение электрона замедляется, а его кинетическая энергия, вместе с шириной энергетической зоны, уменьшается. Можно сказать, что электроны почти перестают двигаться поодиночке, а их собственное кулоновское отталкивание начинает определять поведение всей системы. Подобные плоские зоны сегодня считаются одной из самых перспективных площадок для поиска новых состояний вещества, включая экзотическую сверхпроводимость и необычные магнитные фазы.

Ширина обнаруженной плоской зоны оказалась исключительно малой — около 0,2 миллиэлектронвольта, тогда как энергия взаимодействия между электронами примерно в пять раз больше. Это означает, что система находится в режиме очень сильных корреляций, когда поведение каждой частицы определяется всеми остальными.

Коррелированный изолятор с кольцевыми токами

Когда плоская зона была заполнена электронами наполовину, исследователи увидели резкий скачок электрического сопротивления. Система внезапно становилась практически изолятором. Обычные модели не смогли объяснить этот эффект. Более того, оказалось, что очень слабое магнитное поле — всего около 0,1 тесла — почти уничтожает этот изолирующий режим, хотя энергетическая щель состояния остаётся практически неизменной. Такое поведение указывает на совершенно необычную природу нового состояния.

Авторы предложили оригинальное объяснение наблюдаемому эффекту. Согласно их модели, электроны не «сидят» на отдельных узлах решётки, а коллективно делокализируются внутри маленьких треугольников кагоме-решётки. При этом они образуют замкнутые круговые токи. Каждый такой ток создаёт собственный магнитный момент. В результате в двумерном электронном газе возникает сеть миниатюрных токовых колец, случайно ориентированных друг относительно друга. А небольшое внешнее магнитное поле упорядочивает кольцевые токи, уменьшая рассеяние электронов и резко снижая сопротивление. Исследователи назвали новое состояние петлевым токовым вигнеровским изолятором (loop-current Wigner insulator).

Расчёт как часть проектирования устройства

Созданию работающего устройства предшествовало длительное расчётное сопровождение. С помощью трёхмерного электростатического моделирования с учётом экранирования исследователи определяли, как параметры многослойной полупроводниковой структуры, расстояние до двумерного электронного газа и конструкция затворов влияют на амплитуду периодического потенциала и на размытие энергетических зон (минизон) случайным беспорядком.

Сопоставление численного моделирования с экспериментом в широком диапазоне концентраций электронов и магнитных полей позволило надёжно идентифицировать особенности минизонной структуры и установить, какие из наблюдаемых эффектов не объясняются одночастичной физикой.

«Путь от первоначальной идеи и расчётов до работающего устройства занял много лет. Решающее значение имели качество нелегированной гетероструктуры, точность нанолитографии и возможность независимо управлять плотностью электронов и силой периодического потенциала. Экспериментаторам удалось реализовать режим, в котором минизонная структура не скрыта беспорядком и становится доступной для детального транспортногo исследования», — отметил Виталий Ткаченко.

Новая электронная платформа открывает путь к изучению синтетических квантовых систем с плоскими зонами, дальнодействующими взаимодействиями, орбитальными токами и возможными необычными топологическими свойствами.

Пресс-служба ИФП СО РАН

Контакты: Дмитриева Надежда Валерьевна,
пресс-секретарь ИФП СО РАН
pressa@isp.nsc.ru
89133736776