

ЭЛЕКТРОНЫ В ОДНОМЕРНЫХ И КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПРОВОДНИКАХ

С. Н. АРТЕМЕНКО

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций современной электронной техники является уменьшение размеров приборов и устройств, их миниатюризация. Это относится и ко многим сложным специальным устройствам, и к компьютерам, и к бытовой технике. Пример – всем известный мобильный телефон, который в течение последних лет сильно изменился прямо на наших глазах. Одновременно с уменьшением размеров он вмещает все больше разных устройств, совмещая в себе все больше полезных функций. Тенденция к уменьшению размеров имеет давнюю историю. Раньше электронные приборы были основаны на громоздких электронных лампах. Впоследствии лампы были вытеснены транзисторами – полупроводниковыми приборами, имеющими значительно меньшие размеры, чем лампы. Затем транзисторы стали уменьшаться в размерах и, наконец, появились интегральные схемы, микросхемы, чипы, так что электронные устройства стали состоять из небольших умных кристаллов, включающих в себя целый набор таких различных радиотехнических элементов, как транзисторы, сопротивления, конденсаторы и пр.

Очевидно, что и в дальнейшем инженеры и конструкторы будут стремиться уменьшать электронные приборы, а значит, и составляющие их элементы. Поэтому следует ожидать, что электроника, в значительной степени уже превратившаяся в микроэлектронику, затем превратится в наноэлектронику (микрометр, как известно, равен одной миллионной, а нанометр – одной миллиардной доле метра). Однако при миниатюризации возникают не только чисто технологические проблемы, связанные с трудностями изготовления мелких деталей. При значительном уменьшении размеров кристаллов происходят качественные изменения физических свойств материалов. Это начинается, когда размеры образца сравниваются и становятся меньше каких-либо характерных длин, определяющих протекание физических процессов. Наиболее фунда-

ментальные и интересные изменения происходят, когда при уменьшении размеров сильнее проявляются квантовые свойства электронов, то есть становится важным тот факт, что электрон — это не только частица, но и волна.

О ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ РАЗМЕРОВ КРИСТАЛЛА

В частности, когда размер образца становится порядка длины, на которой забывается фаза электронной волновой функции и теряется ее когерентность, начинаются явления квантовой интерференции электронов. Чаще всего роль такой длины сбой фазы играет длина релаксации энергии, то есть расстояние, проходя которое электрон теряет свою избыточную энергию, отдавая ее другим электронам и фононам — колебаниям решетки. Образцы с размерами меньше длины сбой фазы называются мезоскопическими (“мезо” означает средний, промежуточный), поскольку они имеют промежуточную величину, являясь малыми по сравнению с большими (макроскопическими) кристаллами, но все еще значительно превышают микроскопические атомные размеры. Обычно мезоскопические свойства проявляются в образцах с размерами порядка одного микрона при температурах, близких к температуре жидкого гелия, составляющей 4,2 К (то есть около – 296°С).

В мезоскопических образцах наблюдаются особенности, не встречающиеся в макроскопических образцах, в частности в них не происходит самоусреднения некоторых физических величин, типичного для больших образцов. Например, сопротивление обычных макроскопических образцов зависит не от конкретного расположения примесей, с которыми сталкиваются электроны, а лишь от средней концентрации примесей, которая и определяет величину электрического сопротивления образца. А в мезоскопических образцах, напротив, сопротивление может зависеть от того, как расположены отдельные примеси, потому что на таких размерах уже начинают играть роль волновые свойства электронов. Это происходит потому, что электрон “помнит” начальную фазу волновой функции. Поэтому при самопересечениях электронных траекторий, которые возникают вследствие многократных отражений электронов от примесей, в электронной системе проявляются интерференционные эффекты аналогично тому, как это происходит в оптике, когда пути, проходящие световыми лучами, оказываются меньше длины, на которой теряется когерентность. В макроскопических же образцах интерференция электронов на примесях не играет роли. И в этом случае опять имеется аналогия с оптикой — световые лучи не интерферируют, если оптическая разность хода превышает длину,

на которой теряется когерентность световой волны. Раздел физики твердого тела, который изучает свойства таких относительно малых кристаллов, называется мезоскопикой.

Наиболее сильные изменения происходят, когда какой-либо из размеров кристалла становится сравнимым с длиной волны де Бройля электрона. В этом случае, согласно законам квантовой механики, движение электрона может происходить только в тех направлениях, которые не ограничены размерами кристалла. Если, например, речь идет о тонкой пленке, толщина которой сравнима с электронной длиной волны, то движение электронов внутри пленки возможно только вдоль пленки, то есть электрон может двигаться лишь в двух пространственных измерениях и ведет себя как частица в двумерном пространстве. Соответственно в тонкой проволоке, толщина которой не превышает длины волны электрона, движение электронов становится одномерным, поскольку электроны могут двигаться лишь в одном пространственном измерении — вдоль оси проволоки [1].

Низкоразмерные, то есть одно- или двумерные, структуры чаще всего готовят на основе полупроводниковых гетероструктур, тех самых, за изобретение которых несколько лет назад получил Нобелевскую премию наш соотечественник академик Ж.И. Алферов. В таких структурах за счет изменения состава полупроводникового кристалла внутри полупроводника создается потенциальный барьер, ограничивающий пространственное движение электронов. Если область, в которой может двигаться электрон, имеет форму цилиндра, причем поперечные размеры такого цилиндра меньше электронной длины волны, получится одномерный проводник.

Бывают низкоразмерные проводники и естественного происхождения. Примером естественного одномерного кристалла могут служить углеродные нанотрубки [2]. Всем известно, что атомы углерода могут соединяться между собой химическими связями в длинные цепочки и образовывать сложные молекулы (это свойство, в частности, приводит к существованию многочисленных органических веществ). Из углеродных колец, состоящих из шести атомов и упорядоченных подобно паркету, состоят плоскости графита, а слабо связанные между собой стопки таких плоскостей образуют кристалл графита. Если взять лист из графитовой плоскости и свернуть его в тонкую трубку размером в несколько нанометров, то получится углеродная нанотрубка. Легко догадаться, что нанотрубкой она называется из-за того, что ее диаметр составляет величину порядка нанометра. Подобные трубки бывают как однослойными, так и многослойными. А длина таких

нанотрубок может достигать величины порядка долей миллиметра.

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОМЕРНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Физические свойства двумерных и особенно одномерных систем разительно отличаются от свойств обычных трехмерных систем. Так, например, установлено, что в одномерных системах не может установиться дальний порядок и, следовательно, невозможны фазовые переходы в упорядоченное состояние, в котором порядок сохраняется на больших, макроскопических расстояниях [3, 4]. В частности, в одномерном пространстве не может образоваться кристалл или возникнуть сверхпроводимость. Это происходит потому, что всякий дальний порядок в одномерной системе разрушается сильными флуктуациями, то есть случайными отклонениями физических величин от своих средних значений. Такие отклонения обусловлены тепловым и квантовым движением частиц, которое неизбежно присутствует в любой физической системе.

На качественном уровне понять, почему флуктуации особенно сильны в одномерном случае, можно с помощью следующей простой иллюстрации. Представьте себе, что в какой-то малой области пространства возникла, например, область повышенной концентрации частиц или температуры (иначе говоря, в результате теплового движения частиц в этой области случайно собралось больше частиц, чем в других местах, или собрались частицы с энергией, превышающей среднее значение энергии). Очевидно, что такая флуктуация будет рассасываться тем легче, чем выше размерность пространства.

Действительно, в одномерном пространстве избыточные (в случае флуктуации плотности) или наиболее горячие (в случае флуктуации температуры) частицы смогут убежать только в двух противоположных направлениях, единственно возможных в одном пространственном измерении. В двумерном же пространстве избыточные частицы или лишняя энергия будут уходить на все четыре стороны, в то время как в трехмерном пространстве флуктуация будет спадать уже в шести различных направлениях, возможных при наличии трех независимых осей координат. Роль размерности проявится тут точно так же, как она проявляется в законе уменьшения с расстоянием интенсивности излучения от точечного источника света или величины электрического поля, создаваемого точечным зарядом. Ведь, например, электрическое поле в трехмерном пространстве спадает обратно пропорционально квадрату расстояния, а в двумерном пространстве – обратно пропорционально расстоянию (подобно полю, созданному бесконечной заряженной тонкой

проволокой в трехмерном пространстве). В одномерном же пространстве поле вовсе не будет спадать (как поле заряженной плоскости в трехмерном пространстве). Таким образом, спадание флуктуаций в трехмерном пространстве происходит значительно эффективнее, чем в одномерном случае, и поэтому флуктуации в обычных трехмерных образцах не играют такой значительной роли, как в низкоразмерных системах.

Свойства одномерных проводников существенно отличаются от свойств обычных трехмерных проводников и во многих других отношениях. В частности, к разным результатам приводит кулоновское взаимодействие между электронами. В обычных трехмерных металлах основные свойства электронов хорошо описываются теорией ферми-жидкости Ландау. Согласно представлениям этой теории, несмотря на взаимодействие между электронами, проводники, например, обычные металлы можно рассматривать как состоящие из практически независимых электронов. Межэлектронное взаимодействие модифицирует электроны, превращая их в невзаимодействующие между собой квазичастицы (“квази” в переводе с латинского означает “почти”). Квазичастицы можно представить себе как электроны, окруженные облаком из других электронов, экранирующих взаимодействие. Такие квазичастицы во многих отношениях ведут себя как обычные электроны, в частности они обладают полужелым спином, то есть собственным магнитным моментом, равным половине магнетона Бора. Как правило, квазичастицы для краткости называют электронами, поскольку они очень похожи на исходные электроны. Они также описываются статистикой Ферми, согласно которой в одном квантовом состоянии может находиться не больше одного электрона (отсюда и название “ферми-жидкость”). Существенное отличие квазичастиц от обычных невзаимодействующих частиц состоит в том, что они имеют конечное время жизни. Но поскольку время жизни электронов, определяющих процессы переноса заряда, то есть электронов с энергией, близкой к энергии Ферми, оказывается достаточно большим, то во многих случаях можно забыть о том, что мы имеем дело не с исходными электронами, а квазичастицами. Таким образом, теория ферми-жидкости объясняет, почему свойства металлов неплохо описываются простейшей моделью Зоммерфельда, согласно которой электроны в металле рассматриваются как идеальный газ невзаимодействующих частиц. Электрический ток в рамках такой картины можно описать как сумму вкладов отдельных электронов.

Межэлектронное взаимодействие в одномерной электронной системе приводит к куда более драматичным последствиям, чем в обычном трехмерном случае. Согласно современным представлениям, теория фер-

ми-жидкости, то есть представление об электронной системе как о газе невзаимодействующих квазиэлектронов, в одномерном случае оказывается неприменимой даже при самом слабом межэлектронном взаимодействии. На качественном уровне такой результат можно понять с помощью наглядных соображений, основанных на интуиции и простом здравом смысле. Действительно, в трехмерном пространстве квазичастицы, взаимодействие между которыми заэкранировано, могут с легкостью миновать друг друга без столкновения. А в одномерном случае частицы не имеют возможности разминуться и обойти друг друга. Зато естественно ожидать, что в одномерной системе взаимодействующих электронов смогут существовать коллективные колебания электронов, а именно будут распространяться волны, при которых электроны толкают друг друга и подобные толчки распространяются вдоль всего одномерного проводника.

Точного решения задачи о взаимодействующих электронах в реальных одномерных системах до сих пор не найдено. Однако решение этой задачи было найдено в рамках нескольких различных упрощенных теоретических моделей, и были получены очень близкие и качественно одинаковые результаты. Причем эти результаты вполне согласуются с изложенными выше интуитивными соображениями. Оказалось, что в одномерной электронной системе действительно должна реализоваться физическая картина, несовместимая с концепцией квазиэлектронов. Вместо привычной ферми-жидкости Ландау, характерной для трехмерного случая, возникает так называемая жидкость Латтинджера, в которой отсутствуют квазичастицы, которые вели бы себя подобно отдельным независимым электронам. Единственными элементарными возбуждениями в системе оказываются коллективные колебания электронов. Эти колебания представляют собой два типа независимых друг от друга бегущих волн: волны плотности заряда и волны плотности спина. Из-за того, что зарядовые и спиновые волны могут распространяться независимо друг от друга, говорят, что происходит разделение спиновой и зарядовой степеней свободы. Подобное разделение представляется довольно неожиданным, поскольку носителями как спина, так и заряда являются электроны, в результате чего, как правило, спиновые и зарядовые степени свободы связаны между собой. Тем не менее возможность независимых колебаний плотностей заряда и спина вполне реальна. Например, нетрудно понять, что совместные колебания электронов с противоположными направлениями спина будут сопровождаться возмущениями плотности заряда, в то время как колебания плотности спина будут отсутствовать.

Для того чтобы лучше представить себе, что такое волны плотности, можно обратить внимание на аналогию с обычными упругими волнами в кристаллах, то есть со звуковыми волнами. Звук распространяется по кристаллу при колебаниях атомов вокруг положения равновесия. Звуковые волны имеют линейный спектр, то есть их частота ω пропорциональна волновому вектору k , $\omega = sk$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, где λ — длина волны, а s — скорость звука. Кванты звуковых волн — фононы подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна для частиц с нулевой массой, то есть описываются функцией распределения Планка, подобно световым квантам — фотонам, у которых спектр тоже линейный: $\omega = ck$, где c — скорость света. Электронные волны плотности заряда и спина в одномерной системе также имеют линейный спектр и описываются распределением Планка. Скорости этих волн отличаются друг от друга и зависят от силы межэлектронного взаимодействия. По порядку величины скорости волн равны характерной скорости движения электронов — скорости Ферми, которая значительно больше скорости звука, но, разумеется, намного меньше скорости света.

Очевидно, что поскольку одномерную систему нельзя описывать с помощью теории ферми-жидкости Ландау, электрический ток в ней нельзя представить себе в виде суммы токов, создаваемых независимыми квазиэлектронами. В результате вычисление электрического тока и его зависимости от величины приложенного напряжения в одномерных электронных системах оказывается сложной задачей, которая до сих пор не решена. Существенные трудности возникают, в частности, из-за того, что в одномерных системах резко возрастает роль примесей по сравнению с обычными трехмерными системами. Это также можно понять с помощью наглядных соображений: в одномерной системе электрон не может обойти примесь, через нее ему надо каким-то образом перебраться.

Расчеты электропроводности одномерной системы взаимодействующих электронов в присутствии одной примеси показали, что примесь создает труднопреодолимое препятствие для электронов, вследствие чего не выполняется закон Ома, а ток является степенной функцией напряжения, $I \sim V^{\alpha+1}$, где $\alpha \geq 1$. Эта формула означает, что в пределе малых напряжений сопротивление обращается в бесконечность, приобретая конечную величину только при конечных напряжениях.

Создание последовательной теории, описывающей электропроводность одномерных электронных систем, еще впереди. Много работы по выяснению физических свойств одномерных систем предстоит сделать и экспериментаторам. Причем эта работа не

только интересная, но и сложная, поскольку одномерные системы являются довольно трудными объектами как с точки зрения их изготовления, так и проведения измерений.

КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ ПРОВОДНИКИ

Имеется еще один класс материалов, в которых проявляются эффекты одномерного поведения электронов, — это квазиодномерные проводники, то есть сильно анизотропные кристаллы, состоящие из слабо связанных между собой атомных цепочек с металлической проводимостью. В таких материалах движение электронов близко к одномерному, поскольку электроны с легкостью могут двигаться вдоль проводящих цепочек, но с трудом перескакивают между цепочками. В отличие от искусственных полупроводниковых низкоразмерных структур это естественные материалы с почти одномерным поведением электронов. Примеры: TaS_3 , NbSe_3 , голубая бронза ($\text{K}_{0.3}\text{MoO}_3$) и некоторые органические материалы. Отношение проводимостей в направлениях вдоль и поперек цепочек в некоторых из этих кристаллов достигает нескольких тысяч.

Поскольку эти вещества не совсем одномерные проводники, а почти одномерные, в них могут сочетаться проявления как одномерного, так и трехмерного поведения электронов. В частности, в отличие от чисто одномерных проводников в квазиодномерных кристаллах могут происходить фазовые переходы с образованием дальнего порядка. При комнатной температуре такие проводники ведут себя как обычные, хотя и сильно анизотропные трехмерные металлы, то есть неплохо описываются теорией ферми-жидкости Ландау. При понижении температуры (до 50–250 К в зависимости от конкретного вещества) в них происходит фазовый переход в полупроводниковое состояние, которое возникает из-за спонтанного периодического сдвига атомов кристаллической решетки с периодом, равным удвоенному фермиевскому импульсу. Сдвиг атомов создает периодический возмущающий потенциал, в результате чего электроны с энергией, равной энергии Ферми, будут испытывать сильное брэгговское отражение и не смогут распространяться по кристаллу. (Здесь снова возникает аналогия между электронными и световыми волнами — в данном случае периодический потенциал играет роль дифракционной решетки.) В результате в спектре электронов при энергии, равной энергии Ферми, не будет разрешенных состояний, то есть образуется энергетическая щель 2Δ , которая отделяет пустые электронные состояния от заполненных (рис. 1). Значит, такие материалы не могут быть металлами при низких температурах, они оказываются диэлектриками или полупроводниками. Такой переход называется пайерлсовским, поскольку впервые был

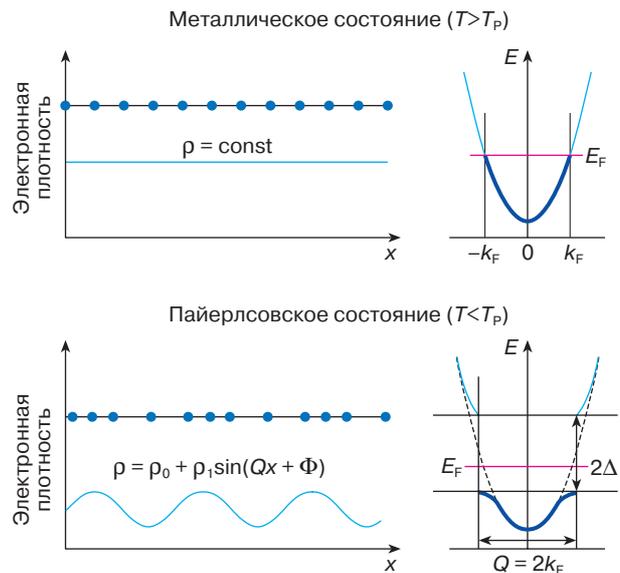


Рис. 1. Зависимости энергии электрона от импульса и схематическая координатная зависимость плотности заряда в металлическом (при температурах $T > T_p$) и пайерлсовском (при $T < T_p$) состояниях квазиодномерного проводника. Заполненные состояния электронов выделены жирными линиями

рассмотрен Р. Пайерлсом в качестве задачи по квантовой механике, которая никак не соотносилась с реальными веществами, поскольку квазиодномерные проводники в то время были неизвестны.

Периодический сдвиг атомов решетки сопровождается периодическим возмущением электронной плотности и, следовательно, заряда, который называется волной зарядовой плотности (ВЗП). Так как различные положения ВЗП в исходном кристалле эквивалентны, то ВЗП может передвигаться по кристаллу и переносить электрический заряд. В реальных веществах всегда имеются примеси, которые нарушают трансляционную инвариантность положения ВЗП, в результате чего для ее движения нужно приложить электрическое поле, превышающее некоторую пороговую величину. Таким образом, ВЗП дает вклад в ток при приложении электрического поля выше некоторого порогового значения, зависящего от чистоты кристалла.

Трансляционная инвариантность ВЗП нарушается и в случае, когда период пайерлсовской деформации соизмерим с периодом исходной невозмущенной решетки. Причем если происходит удвоение периода, то движение ВЗП как целого невозможно. Тем не менее и в этом случае имеется новый механизм переноса заряда, связанный с образованием подвижных искажений ВЗП — солитонов. Солитоны играют роль квазичастиц,

обладающих электронным зарядом, но имеющих нулевой спин либо обладающих спином, но имеющих нулевой заряд (снова разделение зарядовой и спиновой степеней свободы). Примером вещества с удвоением периода является органический квазиодномерный проводник полиацетилен CN_x .

Таким образом, в результате образования ВЗП в квазиодномерном проводнике появляется новый коллективный механизм электронной проводимости. Коллективным он называется потому, что перенос заряда связан не с независимым движением отдельных электронов, как в обычных металлах или полупроводниках, а с коллективным движением многих электронов. В этом смысле квазиодномерные проводники с ВЗП напоминают сверхпроводники, где ток связан с коллективным движением электронов.

Движение и деформация ВЗП приводят к необычным свойствам квазиодномерных материалов, в частности к сильно нелинейной проводимости и огромной диэлектрической проницаемости, а также к различным эффектам памяти и зависимости физических свойств от размеров образцов. Многие физические свойства квазиодномерных проводников с ВЗП к настоящему времени поняты, но все еще остаются фундаментальные вопросы, требующие выяснения. В частности, в образцах этих кристаллов толщиной несколько десятков нанометров наблюдаются интересные явления, возможно указывающие на отклонения от ферми-жидкостного поведения и переход от квазиодномерной к одномерной электронной структуре материала.

Итак, мы убедились, что в одном пространственном измерении в поведении электронов появляются

принципиальные отличия, которые не встречаются в обычных трехмерных проводниках. Фундаментальные физические исследования свойств одномерных и квазиодномерных систем в настоящее время являются одним из стремительно развивающихся разделов физики твердого тела. Результаты этих исследований пока еще не нашли практического применения в электронных приборах и устройствах. Однако предыдущий опыт развития физики убедительно демонстрирует, что накопленные фундаментальные научные знания со временем оказываются востребованными техникой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 80–86.
2. Золотухин И.В. Углеродные нанотрубки // Там же. 1999. № 3. С. 111–115.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976. 584 с.
4. Соколов А.И. Критические флуктуации и ренормализационная группа // Соросовский Образовательный Журнал. 2000. № 12. С. 98–103.

Рецензент статьи В.С. Днепровский