

Релятивистская квантовая механика на кончике карандаша

д.ф.-м.н. С.В.Морозов, заведующий лабораторией Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН

Если вы думаете, что название выбрано, потому что физики-теоретики любят писать карандашами, то это не так. Совсем недавно выяснилось, что когда вы пишете карандашом, могут рождаться объекты, которые описываются законами релятивистской квантовой механики (иными словами - квантовой электродинамикой). Восемь лет назад сотрудникам Университета Манчестера и ИПТМ РАН удалось получить графен, который представляет собой всего одну атомную плоскость, отделенную от объемного кристалла графита. И способ его получения очень похож на то, как пишут карандашом – в следе от карандаша остается множество маленьких чешуек, и надо только найти в оптическом микроскопе тончайшую из них.

Давно прошли времена, когда в физике можно было делать эксперименты «на коленках», но даже сейчас иногда это приносит успех. Сейчас при изготовлении образцов мы используем всю мощь микроэлектронной технологии, но первый толчок дал образец, сделанный из графитовой чешуйки, контакты к которой сделаны обычной проводящей пастой (Рис.1), а проводящая подложка из окисленного кремния служила для всей структуры затвором. А ведь это был прототип первого *полуметаллического транзистора*.

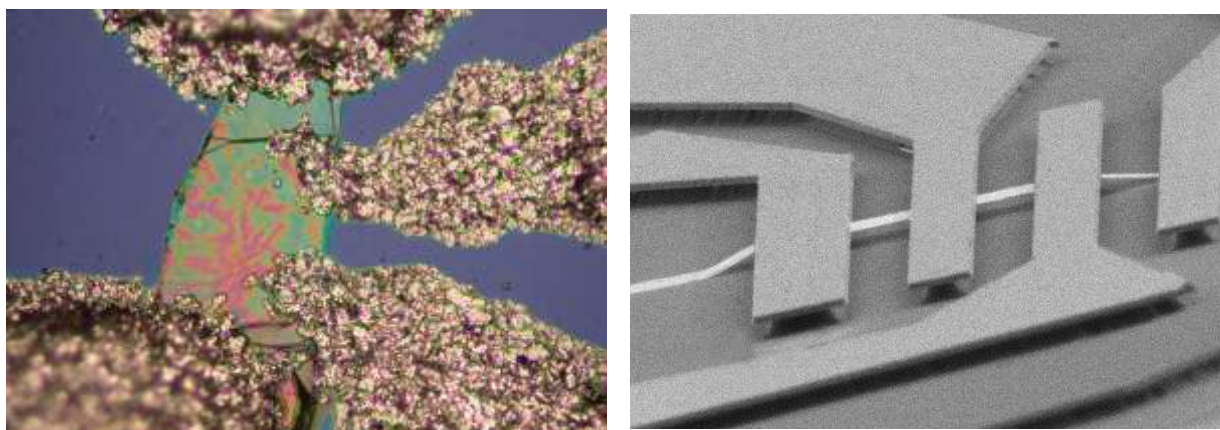


Рис.1. Слева - первый образец, прототип полуметаллического транзистора. Справа – подвешенный между золотыми контактами мостик из графена шириной в один микрон и толщиной в один атом!

Открытие графена мгновенно сделало его одной из самых горячих точек современной физики. И самым удивительным оказалось даже не то, что графен является *двумерным кристаллом*, которые ранее были не известны, и считалось, что они не могут существовать в свободном состоянии. Электроны в графене подчиняются законам квантовой электродинамики, имеют нулевую массу покоя и подобны релятивистским частицам. В частности для них справедливо известное выражение $E=mc^2$ (роль скорости света в графене играет скорость Ферми электронов, которая в 300 раз меньше скорости света). Впервые физики получили возможность изучать в твердотельной системе явления, которые рассматриваются в физике высоких энергий. Но полной аналогии нет и здесь. Ближе всего к электронам в графене по свойствам является нейтрино. Но последние не имеют заряда и, кроме того, электроны в графене являются строго двумерной системой.

Релятивистская физика имеет дело с частицами, имеющими околосветовые скорости. Первопричиной уникальных свойств графена являются не околосветовые скорости, а симметрия кристаллической решетки. Это приводит к тому, что электроны в графене описываются уравнением Дирака, а не уравнением Шредингера, традиционного в твердотельной физике.

Вскоре после появления нового физического объекта, были открыты новые физические эффекты. Первым, и может быть самым ярким свидетельством справедливости теоретических представлений о графене, стал **полуцелый** или «релятивистский» **квантовый эффект Холла**, при котором Холловская проводимость квантуется при полуцелых значениях постоянной Клитцинга (Рис.2).

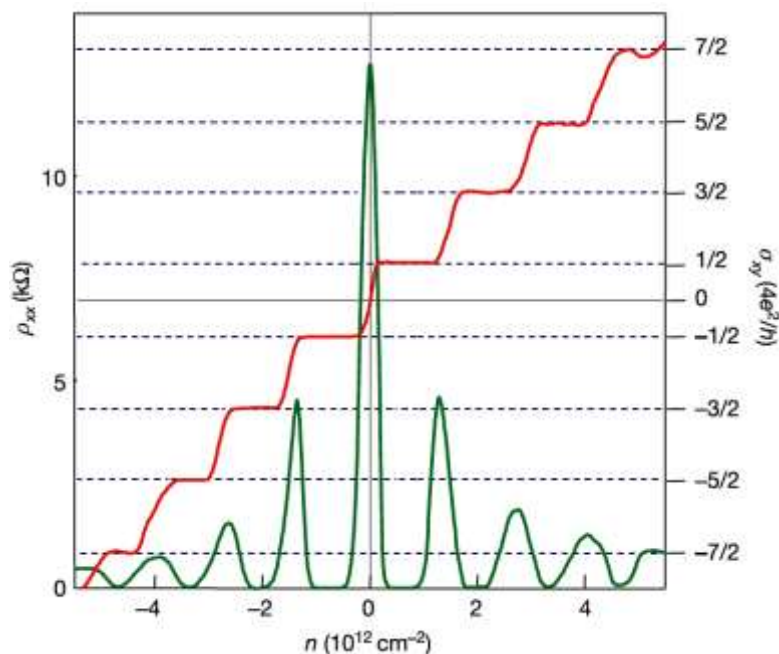


Рис. 2. Квантовый эффект Холла в графене в магнитном поле 13Т. Зависимость продольного сопротивления и Холловской проводимости от напряжения на затворе.

Другая необычная система – графен, толщиной в два атомных слоя, который принципиально отличается как от однослойного графена, так и от многослойных пленок графита. В двухслойном графене наблюдается новый тип квазичастиц, больше не имеющих аналогов в природе. Электроны в нем имеют ненулевую массу покоя, но наследуют элементы симметрии кристаллической решетки монослойного графена, что и определяет уникальность электронных свойств. Но теперь атомы разнесены между двумя монослоями, и можно разрушить эту симметрию, просто поместив пленку в перпендикулярное электрическое поле. В графеновом полевом транзисторе, прикладывая напряжение к затвору, можно управлять зонной структурой этого материала. И это реально использовать в оптоэлектронных устройствах при комнатной температуре – в этом материале можно изменять запрещенную зону от 0 до 0.3 эВ.

Не менее интересен графен и с практической точки зрения. Оказалось, что электроны в графене имеют подвижность при комнатной температуре более чем на порядок превышающую величину подвижности в кремнии и могут двигаться в канале транзистора баллистически (без рассеяния). А это существенно для сверхвысокочастотных и малощумящих транзисторов. Причем по нашим экспериментальным оценкам достигнутая подвижность еще очень далека от верхнего

предела. Учитывая то, что при работе с графеном используется традиционная планарная технология, весьма вероятно, что графен может стать базовым материалом для микроэлектроники в посткремниевую эпоху.

Можно использовать такую совокупность свойств графена, как высокая прозрачность (~98%), низкое удельное сопротивление и химическая инертность. Такие прозрачные пленки могут использоваться в жидкокристаллических дисплеях, которые тогда можно делать еще и гибкими.

Когда говорят о квантовых эффектах в твердых телах, почти всегда имеют в виду очень низкие температуры. В графене многие квантовые эффекты могут «выживать» вплоть до комнатной температуры. Нам удалось продемонстрировать это на примере квантового эффекта Холла и транзистора на квантовых точках.

Хотя первоначальный («скотч-метод») способ получения пока дает самые высококачественные образцы графена, для практических применений требуются другие, более продуктивные методы, позволяющие тиражировать этот материал в промышленных масштабах. В последние годы ситуация с технологией графена развивалась стремительно и такие методы уже продемонстрированы. Наиболее перспективными методами на сегодняшний день являются эпитаксиальный рост графена на поверхности карбида кремния и на поверхности некоторых металлических пленок, успешно развиваемые в лабораториях разных стран.

Можно еще долго продолжать рассказ об уникальных свойствах графена и перспективах его применения. Но ясно одно - графен открыл новую научную парадигму - ***“релятивистская” физика твердого тела*** и находится только в начале пути своего восхождения.