

КЛАССИЧЕСКОЕ МАГНЕТОПРОТИВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В ОДНОМЕРНОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

Г.М.Гусев, З.Д.Квон, В.Н.Овсяк

В вырожденном двумерном электронном газе у высокоиндексной поверхности кремния предсказано и обнаружено магнетосопротивление, появление которого вызвано перестройкой поверхности Ферми электронов под воздействием одномерной сверхрешетки. Эффект имеет резко анизотропный характер и может быть использован как новый метод исследования указанной системы.

Известно, что магнетосопротивление (МС) вырожденного газа со сферически симметричной поверхностью Ферми (ПФ) и изотропным временем релаксации τ мало и по порядку величины равно $(\omega_c \tau)^2 (kT/E_F)^2$. Обычно наблюдаемое МС реальных вырожденных ферми-систем, в частности, металлов, значительно выше, что чаще всего объясняется сложной формой их ПФ (см., например, ^{1,2}).

С точки зрения этой проблемы было бы интересно проследить за изменением МС при переходе от изотропной ПФ к ПФ со сложной конфигурацией. Поскольку в металлах управление формой фермиевской поверхности практически исключено, они не дают возможности осуществить такой переход. Удобным объектом для его наблюдения является вырожденный двумерный газ у высокоиндексной поверхности кремния (являющийся одной из разновидностей ферми-систем), поскольку здесь этот переход достаточно просто осуществляется изменением приповерхностного избытка носителей заряда $\Gamma_{n,p}$. Суть сказанного заключается в следующем. К настоящему времени установлено ^{3,4}, что двумерный газ и электронов, и дырок у вициальной поверхности кремния находится в одномерной сверхрешетке (СР), период которой определяется трансляционной симметрией этой поверхности. В такой одномерной СР при малых избытках носителей заряда ПФ практически изотропна, а при увеличении $\Gamma_{n,p}$, т.е. с приближением к границам зоны Бриллюэна СР, она начинает искажаться и приобретает сложную конфигурацию, которая изменяется в зависимости от положения уровня Ферми. В частности, когда он расположен во второй минизоне, для электронных каналов ПФ состоит из двух замкнутых поверхностей, имеющих форму „собачьей кости” и „линзы” (подробнее см ⁵).

Таким образом, при увеличении $\Gamma_{n,p}$ должен наблюдаться переход от малых величин МС, соответствующих изотропной ПФ, к значительно более высоким, соответствующим фермиевской поверхности, не обладающей сферической симметрией. Обнаружение описанного эффекта дало бы также новый метод исследования двумерного газа у вициальных поверхностей кремния.

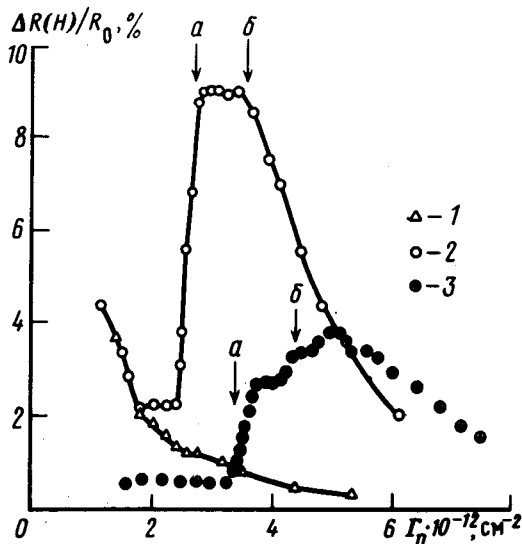
В данной работе указанный переход экспериментально обнаружен при 2 – 4,2 К в двумерном электронном газе у поверхностей кремния, отклоненных на углы θ порядка 10° от поверхности (100). Образцы представляли собой МОП-транзисторы с длиной канала $L = 1200$ и шириной $W = 400$ мкм, изготовленные на указанных поверхностях с углом $\theta = 9^\circ 30'$ и с максимальной подвижностью $\mu_{ns}^m = 1,9 \cdot 10^4$ см²/В·с (обр.1) и углом $\theta = 10^\circ 40'$ при $\mu_{ns}^m = 7 \cdot 10^3$ см²/В·с (обр. 2).

Следует отметить, что в исследованных образцах даже при полях в несколько кГс существенен вклад аномального отрицательного МС, связанного с андерсоновской локализацией ⁶ и его учет требовался для правильного определения положительного МС. Измерения в полях до 200 Гс, когда положительное МС пренебрежимо мало, показали, что зависимость отрицательного МС от магнитного поля хорошо описывается формулой (1) из ⁶. Пользуясь этим

фактом, можно было определить величину отрицательного МС при больших значениях H . Истинное значение положительного МС находилось вычитанием определенного таким образом отрицательного МС из непосредственно измеряемого, причем ошибка в определении положительного МС не превышала 10 %.

На рисунке приведены экспериментальные зависимости положительного МС для направления тока вдоль оси СР ($\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$) и перпендикулярно ей ($\Delta R_{\perp}/R_{\perp}$). Рассмотрим данные для обр. 1. При малых значениях Γ_n МС ведет себя аналогично каналам на сингулярных поверхностях (100) и одинаково для обоих направлений тока. Существование этого МС обусловлено конечностью отношения $L/W=3$, а само МС пропорционально квадрату подвижности. При приближении к дну минищели (и, следовательно, к границе зоны Бриллюэна) $\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$ перестает уменьшаться, а в непосредственной близости от нее резко возрастает до некоторого значения, которое остается постоянным, пока уровень Ферми проходит через минищель. С выходом во вторую минищель $\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$ начинает монотонно убывать с ростом Γ_n . Зависимость $\Delta R_{\perp}/R_{\perp}$ от Γ_n ведет себя иначе. Величина $\Delta R_{\perp}/R_{\perp}$ по-прежнему монотонно уменьшается с увеличением Γ_n пропорционально квадрату подвижности и на порядок меньше величины $\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$ (когда $\Gamma_n > \Gamma_n^{\Delta}$, где Γ_n^{Δ} соответствует началу минищели). Таким образом, предсказанный эффект наблюдается только вдоль оси СР. Это означает, что одномерная СР на вициальной поверхности кремния видоизменяет ПФ таким образом, что изменение τ и эффективной массы электронов m_n при движении вдоль нее носит резко анизотропный характер — отношение τ/m_n , соответствующее дрейфу вдоль оси СР, меняется сильно, а соответствующее дрейфу в перпендикулярном направлении остается постоянным, по крайней мере в пределах погрешности измерений МС.

Интересно также отметить, что пока уровень Ферми остается в минищели, $\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$ не изменяет своей величины, что, по-видимому, указывает на постоянство формы ПФ электронов в этой области энергий.



Зависимость $\Delta R(H)/R$ от Γ_n при $H=3,3$ кГс и $T=4,2$ К для направления тока вдоль оси СР (1) и перпендикулярно ей (2, 3) (1, 2 — обр. 1, 3 — обр. 2, стрелками "а, б" обозначены границы минищели, определенные по измерениям проводимости)

Зависимость $\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$ от Γ_n для обр. 2 имеет два отличия. Во-первых, начало резкого возрастания МС сдвинуто в сторону больших Γ_n ; этот эффект связан с большим углом наклона поверхности, что подтверждается величиной сдвига, равной $\Delta\Gamma_n = \Gamma_n^{\Delta} (\theta = 10^\circ 40')$ — $\Gamma_n^{\Delta} (\theta = 9^\circ 30')$. Во-вторых, сильно уменьшилась величина $\Delta R_{\parallel}/R_{\parallel}$, а область ее постоянства резко сузилась. Такое поведение является следствием того, что в районе минищели время релаксации для обр. 1 в два раза больше, чем для обр. 2, т.е. обнаруженный эффект чувствителен к размытию ПФ, вызванному рассеянием электронов.

Приведенные результаты показывают, что обнаруженное явление дает возможность получать новую информацию о законе дисперсии и поведении времени релаксации в описываемых двумерных системах; до настоящего эксперимента о поведении ПФ при прохождении уровнем Ферми минищели не было вообще никаких данных.

В связи с этим следует, отметить, что построение количественной теории МС в двумерном электронном газе с одномерной СР позволило бы получать уже более полную информацию о свойствах такой двумерной системы.

Авторы благодарят Э.М.Баскина, В.А.Петрова и М.В.Энтина за полезные обсуждения результатов работы, а И.Г.Неизвестного за интерес и поддержку данных исследований.

Литература

1. Займан Д. Электроны и фононы, М.: ИЛ, 1962.
2. Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. Электронная теория металлов, М.: Наука, 1971.
3. Cole T., Lakhany A., Stiles P.J. Phys. Rev. Lett., 1976, 38, 722.
4. Квон З.Д., Кольцов Б.Б., Неизвестный И.Г., Овсяк В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 587.
5. Волков В.А., Петров В.А., Сандомирский В.Б. УФН, 1980, 131, 423.
6. Альтшулер Б.Л., Аронов А.Г., Ларкин А.И., Хмельницкий Д.Е. ЖЭТФ, 1981, 81, 768.

Институт физики полупроводников
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
6 января 1983 г.