

ОСЦИЛЛЯЦИИ ААРОНОВА-БОМА В ДВУМЕРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

Г.М. Гусев, Э.Д. Квон, Л.В. Литвин, Ю.В. Наставшев, А.К. Калагин,
А.И. Торонov

*Институт физики полупроводников СО РАН,
630090, Новосибирск*

Поступила в редакцию 28 ноября 1991 г.

Обнаружены осцилляции магнетосопротивления двумерного электронного газа в искусственно созданной двумерной периодической решетке рассеивателей. Найдено, что период осцилляций по магнитному полю равен $h_c/2eS$, где S - площадь квадрата, связанная с периодом решетки, и определяется эффектом Ааронова - Бома электронов, интерферирующих при рассеянии на этой решетке.

Интерференция электронов играет существенную роль в явлениях переноса в проводниках с примесями, определяя температурную зависимость проводимости этих систем при низкой температуре и их поведение в магнитном поле, в частности, отрицательное магнетосопротивление¹. В последнее время в физике двумерных систем появился новый объект - двумерный (2D) электронный газ в периодической решетке антиточек^{2,3}, которые определяют рассеяние носителей в отсутствие магнитного поля и в слабых магнитных полях^{4,5}. В таком случае должна наблюдаться интерференция электронов при рассеянии на антиточках.

В данной работе обнаружены осцилляции магнетосопротивления 2D электронного газа, находящегося в решетке антиточек с периодом по магнитному полю, зависящим от периода этой решетки.

Экспериментальные образцы представляли собой холловские мостики на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с 2D электронным газом. Расстояние между потенциометрическими зондами было 500 мкм, ширина мостика - 200 мкм. Параметры исходных гетероструктур были следующими: концентрация электронов $n_s \approx (4 - 5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, подвижность $\mu = (1,5 - 5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Решетка антиточек, созданная с помощью электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления, покрывала часть образца между потенциометрическими зондами (см. рис.1). Исследовались образцы с периодом решетки $d - 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1$ и $1,3$ мкм и диаметром антиточек $2r = 0,15 - 0,2$ мкм. Магнетосопротивление измерялось по четырехточечной схеме с помощью активного моста переменного тока на частотах 70 - 700 Гц в магнитных полях до 8 Тл при температурах 1,3 - 4,2 К.

В сильных и сравнительно слабых магнитных полях наблюдались, наряду с осцилляциями Шубникова - де Гааза, дополнительные осцилляции, поведение которых описано в работе⁶. В данном случае подробно изучалось магнетосопротивление в области магнитных полей до 200 Гс. На рис. 1а показаны зависимости магнетосопротивления $\Delta R(B)$ для образцов с наименьшими периодами сверхрешетки. Видно, что на фоне отрицательного магнетосопротивления имеются особенности, положение которых зависит от периода решетки d . На образце с периодом $d = 0,6$ мкм наблюдаются две особенности, что свидетельствует об осцилляционном характере их поведения. На образце 2 вторая осцилляция не видна из-за положительного магнетосопротивления, связанного

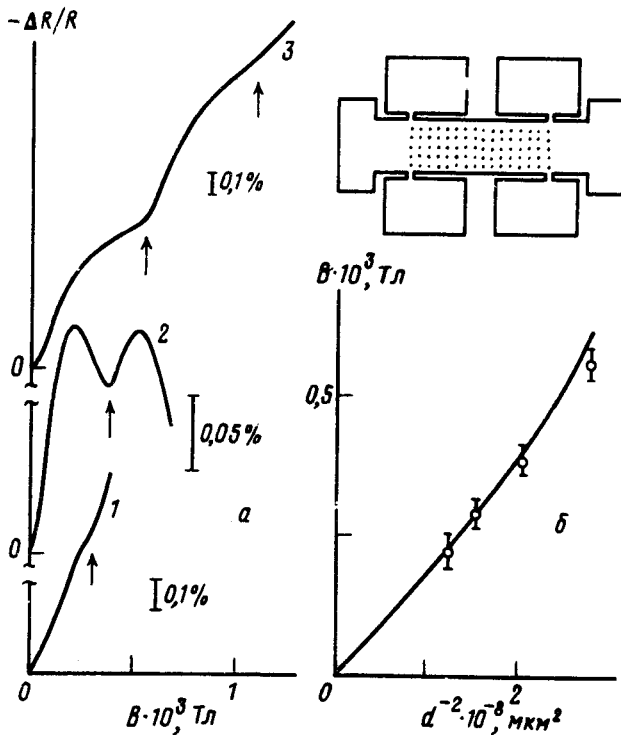


Рис. 1. *a* - Зависимость магнетосопротивления для образцов с различным периодом решетки антиточек d : 1 - 0,8 мкм; 2 - 0,7 мкм; 3 - 0,6 мкм; $T = 1,7$ К. *б* - Зависимость периода осциллирующего магнетосопротивления от $1/d^2$. Сплошная линия - расчет по формуле $B = hc/2eb^2$. Вставка - схематический вид образца

с формированием замкнутых орбит вокруг антиточек ^{4,5}. Наблюдаемые осцилляции, как и отрицательное магнетосопротивление, зависят от температуры - с увеличением T до 4,2 К они уменьшаются. На образцах с большим периодом осцилляции отсутствовали.

Перейдем к обсуждению полученных результатов. Наиболее однозначно можно связать обнаруженные осцилляции с эффектом Ааронова - Бома, когда интерферируют электронные волны, бегущие по разным траекториям. Впервые это явление в неупорядоченных проводниках было предсказано в работе ⁶ и наблюдалось в ⁷ при измерении магнетопроводимости тонкостенных металлических цилиндров малых размеров. В этом случае интерферируют электроны, двигающиеся вокруг цилиндра в противоположных направлениях, а период определялся квантом потока $\Phi_0 = hc/2e$. Для наблюдения этих осцилляций должно выполняться условие $l_e \ll L_\varphi \sim L$, где l_e - длина пробега, L_φ - длина фазовой когерентности и L - периметр цилиндра. Другая геометрия образцов, близкая к той, что использовалась в данной работе, применялась для изучения этих осцилляций в тонких пленках магния ⁸, где образец имел вид сетки с периодом $d = 1,5$ мкм. Отметим, что во всех этих случаях выполнялся "грязный" предел, когда $l_e \ll L_\varphi$, и интерферируют электронные траектории вокруг отверстия. В нашей ситуации примесей почти нет, а роль рассеивателей выполняет периодическая решетка антиточек. Тогда в слабых магнитных полях среди всех возможных электронных траекторий можно выбрать те, которые составляют замкнутый контур. Одна из возможных траекторий показана на рис.2. Электрон, вылетающий из точки А, может двигаться по часовой и против часовой стрелки, а интерференция этих траекторий в магнитном поле дает осцилляции с периодом $hc/2eb^2$. Мы полагаем, что именно эти траектории определяют осцилляции магнетосопротивления, показанные на рис. 1*a*. Осцилляции с меньшим периодом ΔB не видны, так как связанные с ним траектории имеют периметр больший, чем L_φ , а осцилляции с большим ΔB , которым соответствуют траектории внутри одной ячейки, не видны на фоне

классического магнетосопротивления, чей вклад доминирует в сильных магнитных полях. Для наблюдения осцилляций, связанных с другими траекториями, требуются более низкие температуры. На рис. 1б показаны значения магнитных полей, в которых наблюдаются осцилляции, а сплошной линией - расчетные значения, полученные из геометрического представления, показанного на рис.2. При определении периода осцилляций учитывался диаметр антиточек c , который в расчете оказался в два раза больше, чем геометрический размер антиточек. Это связано с наличием вокруг антиточек областей обеднения, размер которых можно получить независимо из осцилляций магнетосопротивления в сильных магнитных полях (см. ⁵). В нашем случае ширина областей обеднения $t = 0,1$ мкм, что соответствует полученному выше значению диаметра антиточек $c = 2r + 2t$.

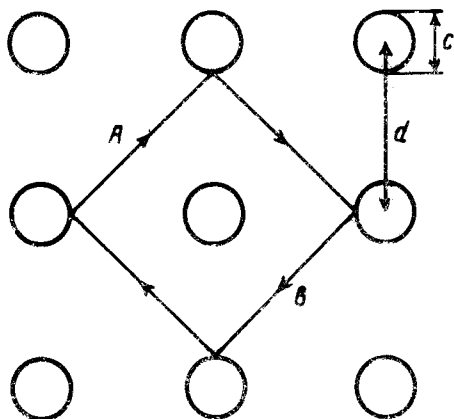


Рис. 2. Схематическое изображение траекторий электрона, дающих вклад в осцилляции Ааронова - Бома

Из рис. 2б видно, что период осцилляций удовлетворительно описывается формулой $\Phi_0 = hc/2eb^2$. Следует отметить, что при сравнении с теорией мы используем квант потока сверхпроводимости, когда учитывается интерференция траекторий при рассеянии назад в точку А ^{1,6}. Интерференция при рассеянии вперед усредняется, поскольку образец имеет макроскопические размеры ⁹.

Отметим также, что зависимость отрицательного магнетосопротивления от B плохо описывается формулами для 2D случая ¹⁰, что затрудняет определение L_ϕ в нашей ситуации. Если все же использовать эти формулы для оценки величины L_ϕ , она получается равной 1 - 2 мкм, что соответствует условию наблюдения осцилляций Ааронова - Бома $L \sim L_\phi$.

Таким образом, в эксперименте обнаружены осцилляции магнетосопротивления, обусловленные эффектом Ааронова - Бома на электронных траекториях, возникающих при упругом рассеянии двумерных носителей на искусственно созданной с помощью электронной литографии периодической решетке рассеивателей.

В заключение авторы благодарят В.Г.Плюхина за проведение плазмохимического травления.

1. P.Lee, T.V.Ramakrishnan, Rev. Mod. Phys. 57, 287 (1985).

2. K.Ensslin, P.M.Petroff. Phys. Rev. B 41, 12307 (1990).

3. А.А.Быков, Г.М.Гусев, З.Д.Квон и др. Письма в ЖЭТФ 53, 407. (1991).
4. Г.М.Гусев, В.Т.Долгополов, З.Д.Квон и др. Письма в ЖЭТФ 54, 369. (1991).
5. D.Weiss, M.L.Roukes, A.Menschig et al. Phys. Rev. Lett. 66, 2790, (1991).
6. Б.Л.Альтшулер, А.Г.Аронов, Б.З.Спивак. Письма в ЖЭТФ 33, 101. (1981).
7. Д.Ю.Шарвин, Ю.В.Шарвин. Письма в ЖЭТФ 34, 285. (1981).
8. B.Pannetier, J.Chauvy, R.Rammal, P.Candit. Phys. Rev. Lett. 53, 718. (1984).
9. C.P.Umbach, C.van Haesendonck, R.V.Laibowits et al. Phys. Rev. Lett. 56, 386. (1986).
10. Б.Л.Альтшулер, А.Г.Аронов, А.И.Ларкин, Д.Е.Хмельницкий. ЖЭТФ 768, (1981).