

05.4

## **Квантовые осцилляции дифференциального сопротивления контактов сверхпроводник–двумерный электронный газ**

© В.Н. Губанков, М.П. Лисицкий, С.С. Шмелев

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

Поступило в Редакцию 29 июля 1997 г.

При низких температурах наблюдались осцилляции дифференциального сопротивления контакта сверхпроводник–двумерный электронный газ, отражающие квантовый характер переноса электрического заряда в направлении, перпендикулярном двумерному электронному газу.

Изучение свойств контактов сверхпроводник–двумерный электронный газ (Сп–2ДЭГ) представляет интерес прежде всего с точки зрения анализа процессов переноса электрического заряда из одной макроскопической квантовой системы в другую, качественно отличающуюся от первой, причем определенные особенности переноса могут быть связаны и со спецификой области контакта, в частности если его размеры меньше характерных пространственных масштабов контактных систем (длины когерентности, длины свободного пробега электронов). До сих пор в подавляющем числе работ (см., например, [1,2]), в которых исследовались структуры Сп–2ДЭГ, наблюдался процесс переноса заряда вдоль канала с 2ДЭГ со сверхпроводящим затвором. В данной работе сделана попытка использования непосредственного контакта Сп–2ДЭГ с пропусканием транспортного тока перпендикулярно плоскости 2ДЭГ. Наблюдались особенности поведения дифференциального сопротивления контакта, которые связываются со структурой энергетического спектра 2ДЭГ.

Исследовались контакты In–GaAs/AlGaAs. Для их изготовления на монокристаллической полуизолирующей пластине GaAs толщиной 300  $\mu\text{m}$  методом молекулярно-лучевой эпитаксии были последовательно выращены следующие слои:

- 1)  $n$ -GaAs нелегированный буферный слой (толщина 0.7  $\mu\text{m}$ );
- 2) AlGaAs нелегированный слой (спейсер) (толщина 0.005  $\mu\text{m}$ );

3)  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  легированный слой ( $x = 0.3$ ,  $n \sim 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , толщина  $0.06 \mu\text{m}$ );

4)  $n^+\text{GaAs}$  слой, легированный Si ( $n \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , толщина  $0.02 \mu\text{m}$ ).

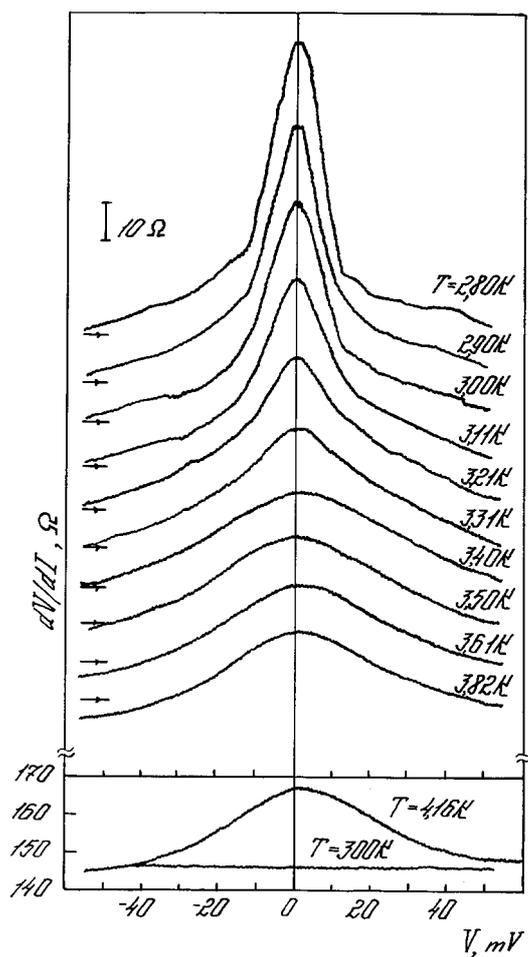
Изготовленная пластина была разрезана на отдельные части (подложки) квадратной формы со стороной 5 mm. Каждая подложка служила основой для изготовления единичного образца. В каждом из углов подложки были изготовлены точечные омические контакты к области с 2ДЭГ, служившие для измерения эффекта Холла методом Ван дер Пау (площадь каждого точечного контакта составляла  $\sim 0.3 \times 0.3 \text{ mm}$ ).

Омические контакты были сформированы путем термического напыления In с последующим его вжиганием при температуре  $T = 300^\circ\text{C}$  в течение 5 min. После изготовления четырех угловых точечных контактов осуществлялось формирование контакта Сп–2ДЭГ. Индиевый туннельный контакт круглого сечения диаметром 4 mm формировался при термическом напылении пленки In толщиной  $0.2 \mu\text{m}$  через металлическую маску с последующим отжигом образца при температуре  $T = 300^\circ\text{C}$  в течение интервала времени, меньшем 5 min.

Из измерений эффекта Холла экспериментально оценивались подвижность и концентрация носителей в области с 2ДЭГ при комнатной и азотной температурах. Было обнаружено возрастание подвижности электронов от  $2900 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  при комнатной температуре до  $20\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  при температуре жидкого азота, что является прямым свидетельством существования двумерного электронного газа в гетероструктуре GaAs/AlGaAs после завершения термических процессов.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) контакта In–GaAs/AlGaAs осуществлялось по четырехзондовой методике: зонды  $I^+$  и  $V^+$  присоединялись к центральному индиевому контакту круглого сечения, а зонды  $I^-$  и  $V^-$  присоединялись к двум угловым омическим контактам. Дифференциальное сопротивление  $dV/dI$  контакта измерялось при синусоидальной токовой модуляции с помощью синхронного детектирования сигнала на контакте.

При комнатной температуре ВАХ контакта была линейной в интервале напряжений до  $\pm 4 \text{ mV}$  (сопротивление контакта составляло  $146 \Omega$ ). При понижении температуры вплоть до 4.2 K ВАХ становилась нелинейной, причем наблюдалось увеличение сопротивления контакта при  $V = 0$ . Нелинейность ВАХ ярко проявлялась на зависимости  $dV/dI$  от напряжения смещения  $V$ . На рис. 1 показаны кривые



**Рис. 1.** Зависимости  $dV/dI(V)$  при различных температурах. Кривые, измеренные в температурной области  $T \leq 3.82$  K, смещены друг относительно друга (для каждой кривой соответствующей стрелкой отмечена величина  $dV/dI = 150 \Omega$ ).

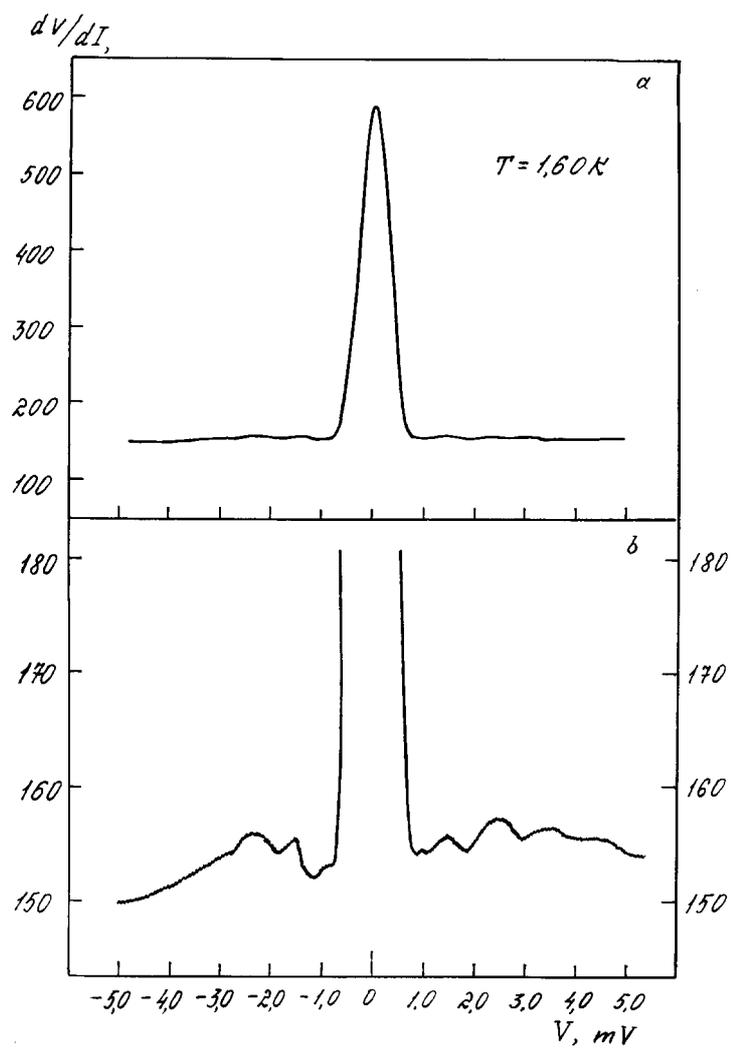


Рис. 2. *a* — зависимость  $dV/dI(V)$ , измеренная при  $T = 1.6$  K; *b* — та же зависимость показана в увеличенном масштабе по току.

$dV/dI(V)$ , измеренные при различных температурах. Кривые  $dV/dI(V)$ , измеренные в температурной области  $T_c < T < 4.2$  К (для индия  $T_c = 3.4$  К), были подобны друг другу, со слабым возрастанием пика  $dV/dI$  при нулевом напряжении смещения. При дальнейшем понижении температуры ниже  $T_c$  наблюдалось резкое возрастание пика  $dV/dI$  при  $V = 0$  и появление характерных минимумов  $dV/dI$  при  $V \sim 0.5$  мВ. Эти особенности уже наблюдались ранее на контактах Sn–GaAs [3] и  $n^{++}$ GaAs–Nb [4] при низких температурах. При  $T = 1.6$  К — минимальной температуре, достигнутой в данном эксперименте, на кривой  $dV/dI(V)$  были зарегистрированы ярко выраженные осцилляции с характерным периодом  $\sim 1$  мВ (рис. 2).

Известно, что процессы туннелирования через барьер Шоттки в контактах сверхпроводник–вырожденный полупроводник при напряжениях  $V \lesssim \Delta/e$  ( $\Delta$  — энергетическая щель сверхпроводника,  $e$  — заряд электрона) аналогичны процессам, имеющим место в контактах сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (SIN). Действительно, вид зависимостей  $dV/dI(V)$ , измеренных при  $T < T_c$ , близок к аналогичным зависимостям SIN контакта. Отсюда можно сделать вывод о том, что наблюдаемые ВАХ и зависимости  $dV/dI(V)$  отражают туннелирование одночастичных возбуждений через барьер Шоттки, образовавшийся на границе между индием и легированным  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , причем характерные минимумы  $dV/dI(V)$  обусловлены присутствием энергетической щели в спектре квазичастиц сверхпроводящего In.

Обнаруженные при  $T = 1.6$  К осцилляции  $dV/dI(V)$  с характерным периодом  $\sim 1$  мВ, скорее всего, связаны с проявлением квантовых уровней в электронном спектре возбуждений 2ДЭГ в том случае, когда перенос заряда происходит в направлении, перпендикулярном плоскости 2ДЭГ [5]. Характерный масштаб осцилляций по оси напряжений по порядку величины соответствует результатам теоретических оценок разности электронных уровней квантования в 2ДЭГ в модели треугольного потенциала [6]. Дисперсия периода осцилляций  $dV/dI$  может быть обусловлена размытием расстояния между областью с 2ДЭГ и продифундированным индием по плоскости контакта.

Таким образом, изготовленные контакты In–GaAs/AlGaAs при переходе In в сверхпроводящее состояние обладали свойствами, соответствующими структуре сверхпроводник–барьер Шоттки–легированный полупроводник–двумерный электронный газ с переносом заряда в перпендикулярном к плоскости 2ДЭГ направлении.

Работа финансируется Российским фондом фундаментальных исследований по гранту № 95-02-04449.

## **Список литературы**

- [1] *Kleinsasser A.W., Jackson T.N., McInturff D.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 55. N 18. P. 1909–1911.
- [2] *Gao J.R., Heida J.P., van Wees B.J.* et al. // *Surface Science*, 1994. V. 305. P. 470–475.
- [3] *Gao J.R., Heida J.P., van Wees B.J.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. N 3. P. 334–336.
- [4] *Барчукова В.И., Губанков В.Н., Енюшкина Е.Н.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 1995. Т. 21. В. 6. С. 12–18.
- [5] *Шур М.* Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1992. С. 479.
- [6] *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. С. 632.