

ниях ( $n_s$  и  $T_e/T$ ) с практически совпадающими параметрами структур (толщины спейсера, величины подвижностей).

Найденные величины  $\tau_s$  используем для оценок времени релаксации импульса  $\tau_p$  по зависимостям  $T_e(E, B)$  (рис. 1 и из [15]):

$$T_e = T \left[ 1 + \left( \frac{E}{sB} \right)^2 \frac{\tau_s}{\tau_p} \lg^2 \theta \right], \quad (2)$$

где  $s$  — скорость звука,  $\lg \theta$  — угол Холла. Расчеты приводят к результату:  $\tau_p(I) = 0.96, 7.5$  и  $2.4 \cdot 10^{-12}$  с,  $\tau_p(II) = 4.6, 10.4$  и  $7.0 \cdot 10^{-2}$  с для  $B_{1-3}$ . Использование выражения для  $T_e(E, B)$  без учета поля Холла приводит к явно заниженным результатам ( $\approx 10^{-14}$  с). Полученные величины  $\tau_p$  хорошо согласуются с  $\tau_p' = 1.0 \cdot 10^{-12}$  с и  $\tau_p'' = 7.3 \cdot 10^{-12}$  с, найденным по температуре Дингла ( $T = 5.9$  К) и подвижности  $\mu$  при 4.2 К.

Хотя применение теории [15] к двумерному газу электронов проблематично, но, согласно [13], релаксационные параметры  $\tau_s$  и  $\tau_p$   $2D$ -электронов близки к объемным аналогам. Так что полученные нами данные несут достоверную информацию о процессах релаксации  $2D$ -электронов в квантующем магнитном поле.

#### Список литературы

- [1] Быковский Ю. А., Елесин В. Ф., Кадушкин В. И., Протасов Е. А. // Письма ЖЭТФ. 1969. Т. 10. В. 6. С. 237—240.
- [2] Быковский Ю. А., Елесин В. Ф., Гарифуллин И. А., Кадушкин В. И., Протасов Е. А., Родионов А. Г. // Изв. вузов СССР. Физика 1972. № 2. С. 96—100.
- [3] Кадушкин В. И., Садофьев Ю. Г., Суслов А. И. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 7. С. 1933—1937.
- [4] Hönlein W., Laudwehr G. // Surf. Sci. 1982. V. 113. P. 260—266; 1984. V. 142. P. 82—85.
- [5] Долгополов В. Г., Шашкин А. А., Дорожкин С. И. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. В. 6(12). С. 2113—2123.
- [6] Inoue M., Hijamiji S., Hida H., Nambu K., Hashimoto H., Inuishi Y. // 9 Int. Symp. «Gallium Arsenide and Related Comp.». Japan, 1981. P. 257—262.
- [7] Sakaki H., Hirakawa K., Yoshino J., Svensson S. P., Sekiguchi Y., Hotta T., Nishii S., Miura N. // Surf. Sci. 1984. V. 142. P. 306—313.
- [8] Hirakawa K., Sakaki H. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49 (14). P. 889—891.
- [9] Блюмина М. Г., Денисов А. Г., Полянская Т. А., Савельев И. Г., Сеничкин А. П., Шмарцев Ю. В. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44. В. 5. С. 257—260.
- [10] Крещук А. М., Мартинов И. Ю., Полянская Т. А., Савельев И. Г., Сайдашев И. И., Шик А. Я., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 604—608. Sol. St. Commun. 1988. V. 65. N 10. P. 1189—1192.
- [11] Денисов А. А., Кадушкин В. И., Сеничкин А. П. // Тез. докл. V Всес. конф. «Тройные соединения и их применение». Казань, 1987. С. 175.
- [12] Кадушкин В. И., Денисов С. А., Сеничкин А. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 71—74.
- [13] Карпус В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 12—19.
- [14] Коган Ш. М. // ФТП. 1962. Т. 4. В. 9. С. 2474—2484.
- [15] Злобин А. М., Зырянов П. С. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. В. 3. С. 952—961.

Получено 16.06.1989

Принято к печати 23.01.1990

ФТП, том 24, вып. 6, 1990

## АНИЗОТРОПИЯ КВАНТОВЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ПРОВОДИМОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР С $2D$ -ЭЛЕКТРОНАМИ

Кадушкин В. И., Сеничкин А. П.

1. В [1, 2] сообщалось о наблюдении анизотропии подвижности  $2D$ -электронов селективно-легированной гетероструктуры (ГСЛ)  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Это явление связывается с наличием протяженных атомных ступеней на границе раздела гетероперехода. Авторами [3] показано, что в двумерном канале

гетероструктуры с профилированной поверхностью границы раздела гетероперехода следует ожидать перераспределение электронной плотности  $n$ , и, как следствие этого, анизотропию типа [1, 2], так что вопрос о природе анизотропии свойств двумерных полупроводниковых систем с профилированной поверхностью в связи с поисками квазиодномерной проводимости актуален и остается открытым.

Нами выполнены комплексные исследования кинетических эффектов ГСД  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $x \approx 0.30$ ), выращенных на подложках с сильной разориентацией от плоскости (100). Для усиления эффекта анизотропии гетероструктуры с 2D-электронами выращивались на подложках с различным содержанием остаточных примесей, определяемых по оже-спектрам относительно пика галлия: кислорода — 5.5–16 %, углерода — 12–89 %. Морфология структур изучалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа методом угольных реплик с оттенением золотом.

Измерены температурные характеристики проводимости  $\sigma(T)$ , квантовые осцилляции Шубникова — де-Гааза (ШдГ) и классическое магнитосопротивление в слабом

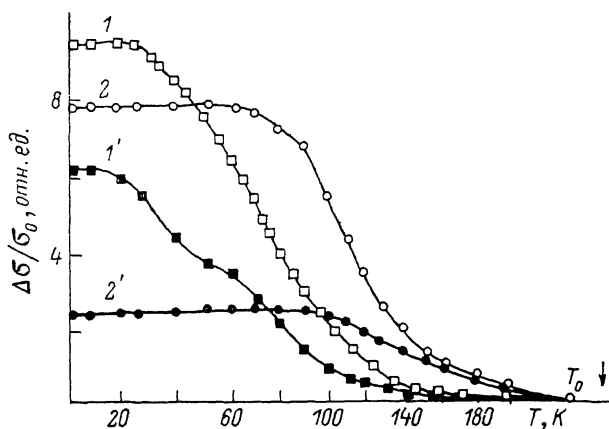


Рис. 1. Анизотропия вольттемпературных характеристик проводимости.

Номера кривых соответствуют номерам образцов.  $n_s$ ,  $\text{см}^{-2}$ : 1 —  $4.85 \times 10^{11}$  (5 % С), 2 —  $8.08 \cdot 10^{11}$  (11 % С). 1', 2' — направление [110], 1', 2' — [110]. Масштаб зависимости 1 — 1:2.

поле. Эффекты анизотропии исследовались на узких длинных образцах, ориентированных по направлениям [110] и [110] (отношение длины к ширине от 3 до 7). Контакты к образцам создавались вжиганием индия в атмосфере водорода. Применялась обычная экспериментальная техника. Измерения выполнялись для направлений «+» и «-» магнитного и «тянущего» электрического полей на образце. Экспериментальному исследованию подвергнуты около 20 структур с  $n_s = (0.4 \div 3.7) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu = (17.9 \div 75.9) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (при  $T = 77 \text{ К}$ ).

2. На рис. 1 и 2 показаны типичные зависимости проводимости  $\sigma$  от  $T$ , приведенные к  $T_0 = 273 \text{ К}$ , и осцилляции ШдГ поперечного магнитосопротивления при 4.2 К. Проводимость в низкотемпературной области обнаруживает анизотропию, по величине более сильную, чем в [1, 2]. Период осцилляций, измеренный по наклону зависимости положений экстремумов  $1/B_N$  от  $N$  — номера магнитной подзоны Ландау, а следовательно, и концентрация 2D-электронов по направлениям [110] и [110] с точностью 0.5 % оказались равными. Два обстоятельства указывают на связь наблюдаемого явления с подвижностью носителей в двумерном канале. Прямые измерения отношения подвижностей  $\gamma_\mu = \mu^{[110]}/\mu^{[110]}$  по классическому магнитосопротивлению  $\Delta\rho/\rho_0 = \xi (\mu\text{В})^2$  в области плато на  $\sigma(T)$  дают  $\gamma_\mu$  для образцов: 1 — 1.3, 2 — 1.2, 3 — 1.1. С другой стороны, по магнитополевой зависимости амплитуды осцилляций была определена температура Дингла [4]: для образца 1  $T_D^{[110]} = 4.5 \text{ К}$ ,  $T_D^{[110]} = 7.2 \text{ К}$ , 2 —  $T_D^{[110]} = 12.4 \text{ К}$ ,  $T_D^{[110]} = 16.5 \text{ К}$ , 3 —  $T_D^{[110]} = 10.1 \text{ К}$ ,  $T_D^{[110]} = 11.2 \text{ К}$ . Очевидна корреляция с данными по измерению анизотропии подвижности с учетом того, что  $T_D = e\hbar/kt^* \mu$ . Температура Дингла — это фактор нетеплового, столкновительного уширения уровней Ландау. Установленная связь между  $n_s$  и  $\mu$  исследованных образцов (с максимумом  $\mu$  при  $n_s \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) показывает, что причиной, ограничивающей подвижность и вызывающей соответствующее уширение  $T_D$ , являются шероховатости поверхности границы раздела гетероперехода [5]. Причем шероховатости имеют характер, направленный преимущественно в [110].

Морфология поверхности также обнаруживает направленный рельеф, но однозначной корреляции характера рельефа и установленной нами анизотропии свойств не имеется. Более того, как следует из всей совокупности измерений, остаточные примеси играют второстепенную роль. Основной причиной анизотропии электрофизических свойств является формирование квазиодно-

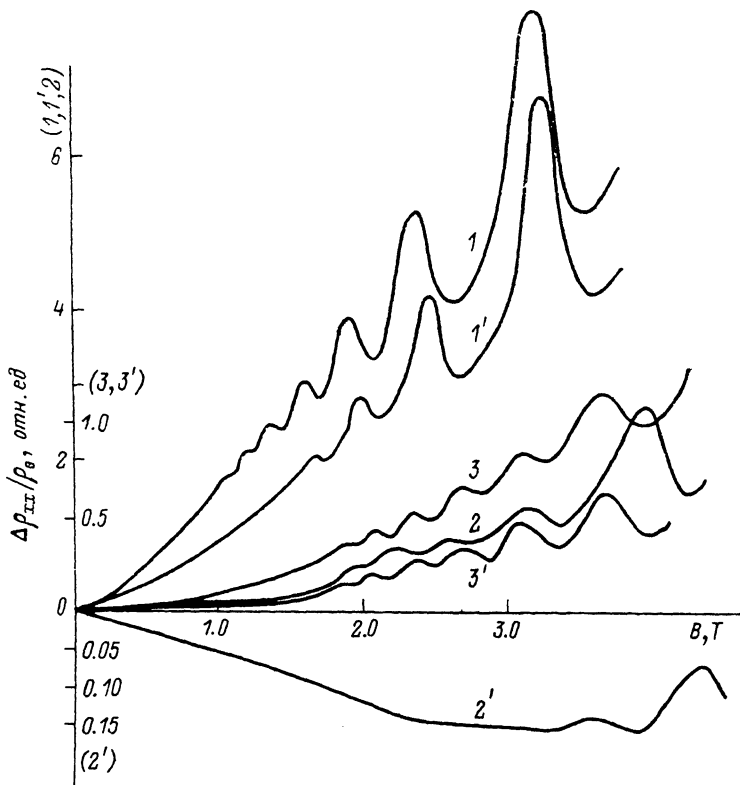


Рис. 2. Анизотропия поперечного магнитосопротивления в осцилляциях ШдГ.

1, 2 — то же, что и на рис. 1. Образец 3 —  $n_0 = 9.51 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (16 % С), 3 — направление  $[110]$ , 3' —  $[1\bar{1}0]$

мерных высокопроводящих состояний в двумерном канале ГСЛ на вращенной поверхности подложки.

Таким образом, впервые непосредственными измерениями показано, что обнаруженная анизотропия низкотемпературной проводимости и магнитосопротивления (в классических и квантовых полях) ГСЛ  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  с  $2D$ -электронами обусловлена анизотропией их подвижности.

#### Список литературы

- [1] Kuan T. S., Wang W. J., Mendez E. E., Esaki L. // Bull. Am. Phys. Soc. 1985. V. 30. N 3. P. 207.
- [2] Lin J. E., Tsui D. C. // Bull. Am. Phys. Soc. 1985. V. 30. N 3. P. 207.
- [3] Шик А. Я., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 6. С. 1091—1095.
- [4] Кадушкин В. И. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 2. С. 230—240.
- [5] Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. М., 1985. 415 с.

Получено 3.07.1989

Принято к печати 23.01.1990