

# АНОМАЛИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ КАНАЛА С 2D-ЭЛЕКТРОНАМИ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

Кадушкин В. И., Денисов А. А., Сеничкин А. П.

1. Измерения температурной зависимости проводимости селективно-легированных гетероструктур (ГСЛ) с двумерными электронами обнаружили особенности, обусловленные конкуренцией механизмов релаксации импульса и локализацией электронов. В равновесной ситуации факторами, ограничивающими подвижность, могут быть кулоновский потенциал примесей, локализованных в тройном соединении  $\text{AlGaAs}\langle\text{Si}\rangle$ , флуктуации потенциального рельефа, вызванного колебаниями мольной доли  $x$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , поверхностные состояния

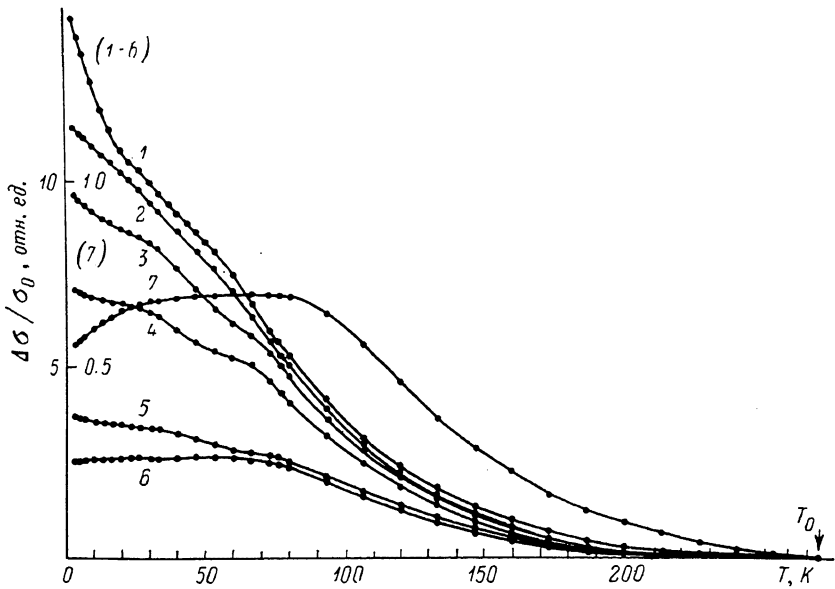


Рис. 1. Типичные ВТХ проводимости ГСЛ с 2D-электронами различной степени совершенства.  $\mu \cdot 10^{-4}$ ,  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ : 1 — 9.9, 2 — 8.3, 3 — 7.0, 4 — 6.2, 5 — 5.3, 6 — 3.6, 7 — 4.6 (при 77 К).

на границе раздела  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , глубокие центры, шероховатости. Достаточно совершенные структуры обнаруживают монотонное возрастание проводимости  $\sigma$  с понижением температуры  $T$ , «примешивание» одного из вышеперечисленных факторов или их комбинация приводит к появлению плато или «завала» температурной характеристики проводимости [1]. Разогрев электронов электрическим полем  $E$  вызывает дополнительно нелинейные эффекты, связанные с локализацией электронов на поверхностных состояниях (ПС) границы раздела гетероперехода с перераспределением их по мини-зонам в квантовой яме [2].

Проведенные нами исследования вольттемпературных (ВТХ) и вольтамперных (ВАХ) характеристик проводимости и эффекта Холла ГСЛ  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $x \approx 0.3$ ), выраженных методом МЛЭ, с концентрацией  $n_s = (1.8 \div 9.9) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью  $\mu = (1.00 \div 3.18) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  выявили известные особенности (рис. 1). Одновременно с этим нами обнаружена аномалия низкотемпературной проводимости, вызванная температурной и электрополовой активацией ПС на границе гетероперехода.

2. Суть явления и его характерные особенности иллюстрирует рис. 2, на котором приведено семейство ВТХ проводимости. Параметром, отличающим кривые 1—7, является величина эффективного электрического поля на образце при 4.2 К  $\langle E_0 \rangle$ . В области  $T \approx 6 \div 7$  К ВТХ обнаруживают экстремум. В интер-

вале  $4.2 \div 25$  К температурная зависимость проводимости носит гистерезисный характер (кривые 2, 3). Увеличение электрического поля на образце приводит к сглаживанию экстремума (со смещением его в область низких температур) и исчезновению гистерезисного эффекта (кривая 6). Энергетическая активация проводимости электрическим полем в экстремуме имеет степенной характер с показателем 1.4. ВАХ проводимости, измеренная при  $T=4.2$  К, детально повторяет особенности ВТХ.

Измерения эффекта Холла в слабом магнитном поле не обнаружили аномалий в температурной зависимости концентрации электронов в двумерном канале гетеропереходов. Это подтверждено и измерениями осцилляций Шубникова — де-Гааза (ШГ) в интервале температур  $4.2 \div 18$  К.

3. Наблюдаемые эффекты естественно объяснить наличием на границе гетероперехода ПС, кулоновский потенциал которых «чувствует» двумерные электроны в квантовой яме. Плато на кривых 1—3 (рис. 2) и 3 (рис. 1) в области  $T$  до 20 К обеспечивается кулоновской релаксацией  $2D$ -электронов на совокупности перечисленных в п. 1 факторов. Видимо, с понижением температуры включается механизм, связанный с поверхностными состояниями, который приводит к убыванию  $\sigma$  по закону  $\sim T^{-0.4}$  в интервале  $20 \div 6$  К. С понижением температуры ПС нейтрализуются локализацией на них электронов и этот механизм релаксации выключается. Проводимость с понижением температуры  $6 \div 4.2$  К релаксирует к величине  $\sigma$  на плато.

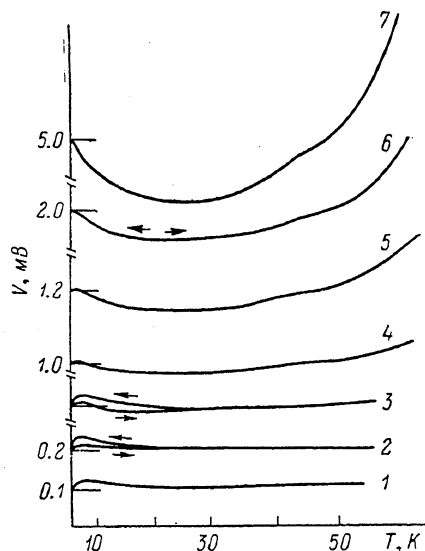


Рис. 2. Вольттемпературные характеристики  $n$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ .

Образец 361 (1),  $n_s = 8.25 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 1.86 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (при 4.2 К).  $\langle E_0 \rangle \cdot 10^3$ , В/см: 1 — 0.25, 2 — 0.50, 3 — 1.25, 4 — 2.50, 5 — 3.00, 6 — 5.00, 7 — 12.5.

Явление гистерезиса обусловлено не симметричным по температуре поведением ПС как рассеивающих центров: в направлении понижения температуры они электрически активны, в сторону повышения температуры — нейтральны. Последнее состояние соответствует большим значениям подвижности, а следовательно, и меньшим значениям электросопротивления.

Особенности поведения  $\sigma(E)$ , аналогичные  $\sigma(T)$ , понятны, если учесть, что активирующим фактором здесь выступает электрическое поле, опосредованное электронной температурой двумерных электронов.

4. Температурно-зависимый компонент ПС, с которым связывается наблюдаемое явление, локализован вблизи границы раздела гетероперехода: температура и напряженность поля  $E$ , активирующие  $2D$ -электроны, недостаточны для возбуждения их в вышележащие мини-зоны и за барьер в слой  $\text{AlGaAs}\langle\text{Si}\rangle$ . Эти ПС могут быть связаны с корреляцией флуктуаций в распределении примесей, которая приводит к созданию потенциального рельефа с характерным радиусом флуктуации  $R_{\phi 1}$ . Полагая, что корреляция в распределении примесей (кремний в легированном слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) обусловлена взаимным дебаевским экранированием их при температуре роста  $T$  гетероструктуры, отождествим  $R_{\phi 1}$  с радиусом Дебая  $r_D = R_{\phi 1}$ . Выражение для средней амплитуды флуктуацией потенциала имеет вид [3]

$$V_{\phi 1} = \frac{e^2 (4\pi N_d r_D^3)^{1/2}}{\kappa r_D}, \quad r_D = \left( \frac{\kappa k T^*}{8\pi N_d e^2} \right)^{1/2},$$

где  $N_d$  — концентрация легирующей примеси (Si),  $\kappa$  — диэлектрическая постоянная. В наших условиях [ $T^* \simeq 800$  К,  $N_d \simeq (1 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ] глубина потенциальных ям составляет  $\simeq 30 \div 40$  мэВ. Температурное положение экстремума

показывает, что потенциальные ямы имеют барьер высотой около 0.6 мэВ над уровнем Ферми  $2D$ -электронов. По величине энергии, определяемой из ВТХ при температуре опыта, и найденной величине потенциальной ямы можно оценить концентрацию поверхностных состояний  $N_{\text{ПС}}$ . Из ВТХ для  $T = 6$  К имеем дефицит энергии  $8 \cdot 10^{-12}$  Дж, что дает  $N_{\text{ПС}} \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Учитывая, что релаксация электронов на кулоновском потенциале этих поверхностных состояний является фактором, ограничивающим подвижность и определяющим нетепловое, столкновительное уширение уровней Ландау, можно оценить независимо концентрацию  $N_{\text{ПС}}$  по температуре Дингля  $T_D$ , измеренную по осцилляциям магнитосопротивления ШГ. Расчет, аналогичный [4], выполняемый для двумерного электронного газа, приводит к соотношению

$$T_D = \frac{\pi \hbar^2}{km^*} n_s \epsilon,$$

где  $\epsilon = \Delta n_s / n_s$  — относительная флуктуация электронной плотности. Полагаем, что последнее происходит из-за флуктуаций ПС:  $\Delta n_s, n_s = \Delta N_{\text{ПС}}, N_{\text{ПС}}$  и  $N_{\text{ПС}} = \epsilon N_s$ . Тогда для данного образца исходя из  $T_D = 1.5$  К и  $N_s = (1 \div 3) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  имеем  $N_{\text{ПС}} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что очень близко к полученному выше результату.

5. Наконец, оценим объемный эквивалент поверхностной концентрации  $2D$ -электронов исходя из  $n = n_s t$  и  $tk_F \approx 1$ , где  $t$  — эффективная ширина двумерного канала,  $k_F$  — волновой вектор электрона [5]. Для исследованной структуры, по данным измерений осцилляций ШГ, имеем  $t = 137 \text{ \AA}$  и  $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Отсюда нетрудно видеть, что захват электронов из ПС сопровождается изменением концентрации их на уровне  $10^{-2}$ , находящемся в пределах погрешности измерений.

6. Структуры с  $\sigma(T)$  типа 1—5 (рис. 1) гистерезиса не обнаружили. По-видимому, явление гистерезиса присуще структурам с характерным взаиморасположением уровня Ферми и потенциальных ям, образуемых поверхностными состояниями на границе гетероперехода. Оно (явление гистерезиса) может служить методом получения количественной информации о параметрах (концентрации и энергетическом положении) поверхностных состояний на границе гетероперехода.

#### Список литературы

- [1] Lin B. J. F., Tsui D. C. // II Int. Conf. Modulated Semicond. Struct. Kyoto, 1985. P. 649—651.
- [2] Schubert E. F., Ploog H., Dämkes D., Heime K. // Appl. Phys. 1984. V. 33. P. 183—193.
- [3] Воронова И. Д. Локализация электронов в компенсированном арсениде галлия // Тр. ФИ АН СССР. 1976. Т. 89. С. 3—58.
- [4] Кадушкин В. И. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 2. С. 230—240.
- [5] Алферов Ж. И., Гореленок А. Т., Мамутич В. В., Полянская Т. А., Савельев И. Г., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 11. С. 1999—2005.

Получено 24.10.1988

Принято к печати 28.04.1989

ФТП, том 23, вып. 9, 1989

## ЭФФЕКТ ЛОКАЛИЗАЦИИ В ИНВЕРСИОННОМ СЛОЕ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

Абрамов В. В., Божко А. Д.,  
Кульбачинский В. А., Чудинов С. М.

Вблизи границы в инверсионном слое на поверхности кремния случайные флуктуации поверхностного потенциала создают крупно- и мелкомасштабный рельеф, который приводит к локализации  $2D$ -электронов. Исследование проблемы локализации в двумерных проводящих системах в настоящее время