

МЕЗОСКОПИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ ВОЛЬТ–АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОТКОГО ОБРАЗЦА С ПРЫЖКОВОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

A.O. Орлов, A.K. Савченко

На коротком (2 мкм) электронном канале полевого GaAs-транзистора обнаружены осцилляции дифференциальной проводимости $\partial J/\partial U$ при изменении тянувшего напряжения U . Объяснение основывается на представлении о смене "главного" прыжка, определяющего проводимость образца.

Мезоскопические эффекты в омической проводимости полупроводников $G_0 = (\partial J/\partial U)(U=0)$ (U – тянувшее напряжение) наблюдались на одномерных Si¹ и двумерных GaAs²⁻⁴ транзисторных структурах с размерами проводящего канала $\lesssim 1$ мкм. В полевом GaAs-транзисторе величина G_0 осциллировала при изменении числа электронов в канале, задаваемого напряжением на затворе V_g ^{2, 3}, и при изменении напряженности магнитного поля⁴. Канал имел в плоскости вид полоски с размерами 2×200 мкм², ток пропускался вдоль короткой стороны. Интерпретация осцилляций на зависимостях $G_0(V_g)$ и $G_0(H)$, которые проявлялись в области низких температур ($T < 10$ К) при малых концентрациях электронов, когда проводимость имеет прыжковый характер, основывалась^{3, 4} на модели "главного" прыжка. Проводимость короткой полоски равна сумме проводимостей отдельных путей, представляющих собой цепочки прыжков. Из-за экспоненциально сильного разброса сопротивлений прыжков проводимость образца определяется одной наиболее проводящей цепочкой, сопротивление которой, в свою очередь, определяется максимальным из последовательных сопротивлений, составляющих цепочку.

Целью настоящей работы является исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) короткого двумерного канала GaAs-транзистора в режиме осцилляций омической проводимости. В мезоскопическом режиме "одного прыжка" можно попытаться непосредственно выделить элементарные электронные процессы, определяющие прыжковую проводимость в сильном поле^{5, 6}. На возможность появления немонотонностей на ВАХ одномерной цепочки прыжков обращалось внимание в работе⁷, перегиб на ВАХ одномерного канала на поверхности кремния наблюдался в работе¹.

На частоте 10 Гц измерялась дифференциальная проводимость как функция тянущего поля сток-исток полевого транзистора на основе эпитаксиального слоя GaAs с концентрацией доноров $3 \cdot 10^{16} - 10^{17}$ см⁻³^{3, 4}. Длина затвора Шоттки составляла 2 – 5 мкм, ширина 200 мкм. На рис. 1 показан пример экспериментальной зависимости для различных напряжений на затворе из области осцилляций $G_0(V_g)$. На зависимости $(\partial J/\partial U)(U)$ видны особенности, которые соответствуют изломам в функции $J(U)$. Обращает на себя внимание, что вид кривых трансформируется при изменении напряжения V_g на величину периода осцилляций омической проводимости – на этом масштабе происходит смена доминирующей цепочки прыжков.

Одной из возможных причин появления изломов в ВАХ является перераспределение напряжения между сопротивлениями прыжков лидирующей цепочки. Согласно⁵ ВАХ одного прыжка при $(eU_n/kT) > 1$ (U_n – напряжение на n -ом прыжке) можно представить в виде:

$$J = \Gamma_0 \exp \left(-\xi_n + \frac{eU_n}{kT} \alpha_n \right). \quad (1)$$

Сопротивление прыжка в омическом режиме есть $\gamma e h \xi_n$, α – коэффициент, учитывающий терминологию⁶ "мягкость" прыжка: $\alpha = 1$ и $\alpha \ll 1$ для "мягкого" и "жесткого" прыжков соответственно. (Величина α определяется расположением энергетических уров-

ней локализованных состояний ϵ_i , ϵ_j , участвующих в прыжке, и положением уровней ферми μ_i , μ_j). Пусть сопротивления прыжков в цепочке при $U=0$ распределены равномерно по ξ в интервале $[0, \xi_{max}]$ с шагом $\Delta\xi$. Все напряжение на цепочке U падает на максимальном сопротивлении $\gamma_{\text{ex}} \xi_{max}$, которое будет уменьшаться с ростом U в соответствии с формулой (1). При некотором напряжении сопротивление "главного" прыжка сравняется с сопротивлением "заместителя" $\gamma_{\text{ex}} (\xi_{max} - \Delta\xi)$, находящимся в омическом режиме. С этого момента приложенное к цепочке напряжение будет делиться между двумя сопротивлениями. В результате всякий раз, когда в неомическом режиме (1) окажется очередное по величине сопротивление, должно наблюдаться ослабление ВАХ цепочки. Если все прыжки в цепочке "мягкие" ($\alpha = 1$), то расстояние между соседними особенностями ВАХ будет расти по закону $\Delta U_{n, n-1} = (kT/e)\Delta\xi n$ (n – порядковый номер особенности). Сглаженная ВАХ такой цепочки имеет вид⁶:

$$J \propto \exp(-\xi_{max} + (\Delta\xi e U/kT)^{1/2}). \quad (2)$$

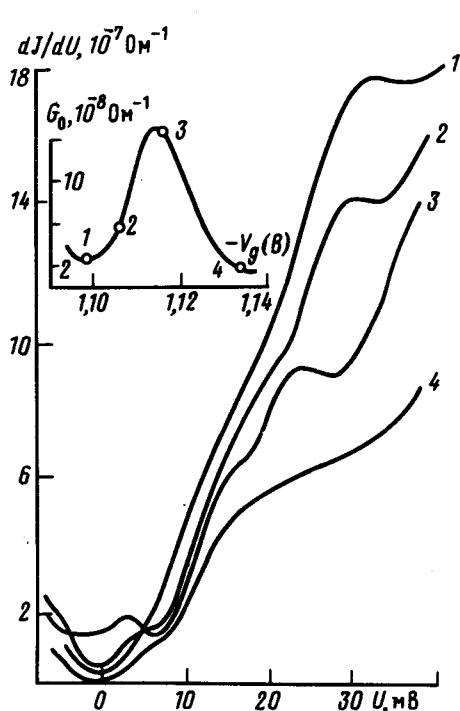


Рис. 1. Зависимость дифференциальной проводимости образца $D1$ от тянувшего напряжения U при различных напряжениях на затворе V_g , отмеченных под соответствующими номерами на вставке; $T = 4,2$ К

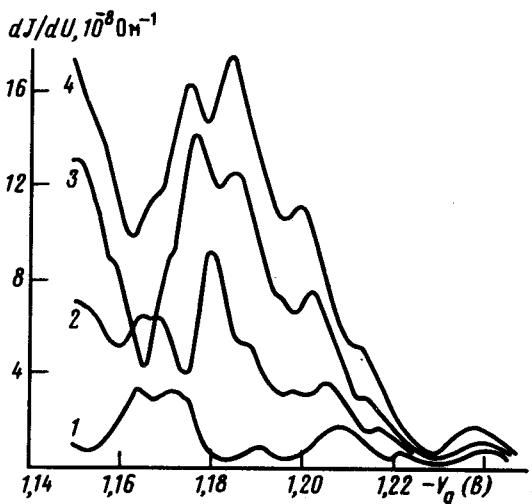


Рис. 2

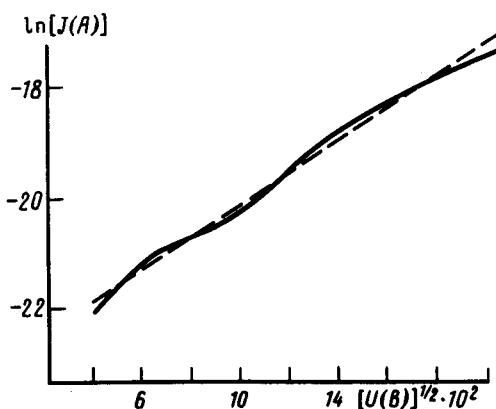


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость дифференциальной проводимости образца $D2$ от напряжения на затворе при различных тянувших напряжениях: 1 – $U = 0$; 2 – $U = 4$ мВ; 3 – $U = 7$ мВ; 4 – $U = 9$ мВ

Рис. 3. Вольт-амперная характеристика образца $D1$. Пунктиром показана аппроксимирующая прямая

В действительности ВАХ различных прыжков в цепочке могут существенно различаться. Если в цепочке есть "жесткий" прыжок ($\alpha \ll 1$), то с ростом U все напряжение упадет на нем и возрастание тока через цепочку существенно замедлится. В результате более низкоомной в образце станет другая цепочка. Таким образом, второй возможной причиной излома на ВАХ (с усилением хода зависимости) может быть смена "жесткого" прыжка на "мягкий", сопровождающаяся сменой лидирующей цепочки.

На рис. 2 показаны кривые $G(V_g)$ при различных значениях тянувшего поля. При $V_g = 1,165$ В наблюдается немонотонность в зависимости $(\partial J/\partial U)(U)$ с минимумом в области $U = 7$ мВ, которую можно связать со сменой лидирующей цепочки. Зависимость проводимости от напряжения на затворе содержит в себе информацию об определенной последовательности смены "главного" прыжка в образце, при этом одна цепочка лидирует в интервале V_g между соседними минимумами $G(V_g)$. Видно, что при увеличении тянувшего поля последовательность смены цепочек в области $V_g = 1,165$ В заметно изменяется: максимум на зависимости $G(V_g)$ сменяется на минимум. Отсюда можно заключить, что усиление хода зависимости $(\partial J/\partial U)(U)$ при $U > 7$ мВ в области $V_g = 1,165$ В связано с переходом от "жесткого" к "мягкому" прыжку с одновременной сменой лидирующей цепочки.

На рис. 3 показана ВАХ с чередующимися изломами (полученная интегрированием кривой 3 на рис. 1). ВАХ исследованных образцов хорошо спрямлялись в координатах $\ln J / (U^{1/2})$ в соответствии с законом (2), что может служить подтверждением цепочечного механизма проводимости в них. Величина характерного разброса омических сопротивлений $\Delta\xi \approx 0,6$, полученная из наклона аппроксимирующих прямых, согласуется с оценкой этой величины из амплитуды осцилляций проводимости: $\Delta\xi = \Delta[\ln G_0(V_g)] \approx 1$.

Авторы выражают глубокую признательность И.М.Рузину и Б.И.Шкловскому за полезные обсуждения.

Литература

1. Webb R.A., Hartstein A., Wainer J.J., Fowler A.B. Phys. Rev. Lett., 1985, **54**, 1577.
2. Pepper M. J. Phys. C., 1979, **12**, 647.
3. Орлов А.О., Савченко А.К., Ченский Е.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, **43**, 421.
4. Лайко Е.И., Орлов А.О., Савченко А.К. и др. ЖЭТФ, 1987, **93**, 2204.
5. Pollak M., Riess J. J Phys. C, 1976, **9**, 2339.
6. Шкловский Б.И. ФТП, 1976, **10**, 1440.
7. Lee P.A. Phys. Rev. Lett., 1984, **53**, 2042.