

06

## Отрицательная дифференциальная проводимость квазиодномерных контактов

© В.К. Неволин

Московский институт электронной техники

Поступило в Редакцию 3 сентября 1997 г.

Исследуется отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП)  $S$ -типа статических вольт-амперных характеристик квазиодномерных микроконтактов. Показано, что пространственный заряд носителей тока в канале с сужениями приводит к ОДП.

Механизмы возникновения статических ВАХ  $S$ -типов различны. Хорошо известны тепловые механизмы возникновения ОДП для токовых шнуров [1], каковым и является квазиодномерный канал. Тепловое увеличение поперечных размеров канала понижает уровни квантования поперечной энергии, что обеспечивает токи при меньших напряжениях после включения. Характерным отличием этих процессов является наличие гистерезиса ВАХ при больших токах, что и наблюдалось в [2].

Однако пространственный заряд носителей тока в квазиодномерном проводе может в ряде случаев при наличии сужения в микроконтакте приводить к ОДП. Наличие сужения канала приводит к зависимости уровней поперечного квантования от продольной координаты и смещению из максимумов во внешнем поле. Пространственный заряд сам по себе даже несколько повышает положение этих уровней относительно энергии Ферми эмиттера. Однако во внешнем поле для ограниченных токов пространственный заряд может сдвигать положение максимумов уровней квантования в сторону от эмиттера, что позволяет пропускать токи после включения при меньших приложенных напряжениях.

Рассмотрим квазиодномерный круглый канал с сужением (рис. 1), геометрические размеры которого таковы, что исходный спектр поперечного квантования энергии носителей тока в канале лежит выше уровня Ферми эмиттера. На расстоянии  $L$  от эмиттера находится плоский электрод, на который подается внешнее напряжение  $U$ .

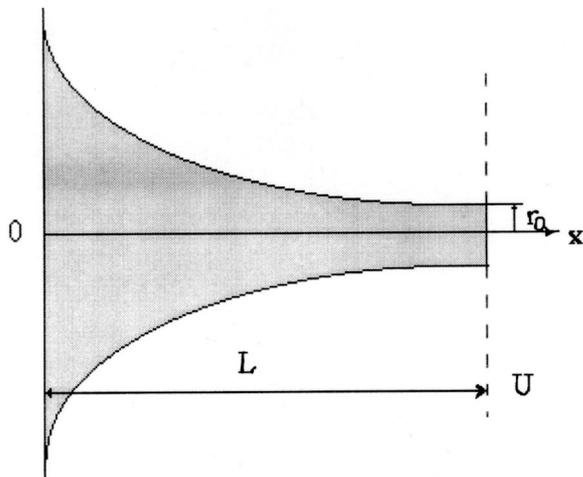


Рис. 1.

В этом случае ток в канале можно найти из соотношений [3]:

$$I = \frac{e}{\pi \cdot \hbar} \sum_{n,i} \Omega_{ni} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} D(E, \tilde{E}_{ni}, eU) dE,$$

$$0 \leq \tilde{E}_{ni} \leq E_f,$$

$$\tilde{E}_{ni}(x_m, I, U) = E_{ni}(x_m) - e\Phi(x_m, I, U), \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = (E_f - \tilde{E}_{ni}),$$

$$eU \geq (E_f - \tilde{E}_{ni}),$$

где  $\Omega_{ni}$  — кратность вырождения пространственного квантования в канале,  $D$  — коэффициент прозрачности канала, который меняется в пределах  $0.5 \leq D \leq 1.0$  и который далее будем считать постоянным и равным некоему среднему значению, тем самым опуская резонансные эффекты, связанные с транспортом баллистических электронов;  $\tilde{E}_{ni}(x_m, I, U)$  — значения уровней поперечного квантования в канале в точках их максимума, поскольку происходит их понижение в приложенном внешнем поле; однако в отличие от [3] считается, что

канал имеет переменное сечение и учитывается экранирующее действие пространственного заряда;  $\Phi(x_m, I, U)$  — значение самосогласованного потенциала в точке максимума  $\tilde{E}_{ni}$ .

Пусть радиус сечения канала меняется по закону

$$r(x) = r_0 [1 + (\Delta/x)^\alpha],$$

где  $\alpha > 0$  — произвольный показатель, характеризующий многообразие профилей канала. Тогда спектр энергии поперечного квантования в канале с конечной высотой стенок можно представить в виде [4]:

$$E_{ni}(x) = E_{ni}^0 / [1 + (\Delta/x)^\alpha]^2, \quad (2)$$

где  $E_{ni}^0$  — значения энергии поперечного квантования при  $x = L$  и условии  $\Delta/L \ll 1$ . Для нахождения потенциала  $\Phi(x, I, U)$  необходимо решать уравнение Пуассона. Запишем распределение плотности заряда для электронов в канале, участвующих в стационарном транспорте, в виде

$$en(x) = I / \left\{ S(x) \left[ (v_f^2 + 2e\Phi(x, I, U)/m)^{1/2} - v_f \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $S(x) = \pi \cdot r^2(x)$  — площадь сечения канала,  $v_f$  — фермиевская скорость электронов.

Каждый уровень энергии поперечного квантования при заданных  $I$  и  $U$  имеет свой максимум в канале, который находится из условия

$$\frac{d\tilde{E}_{ni}(x_m, I, U)}{dx} = 0. \quad (4)$$

Выписанная система уравнений (1)–(4) позволяет рассчитать ВАХ микроконтакта с сужением при учете пространственного заряда.

Для оценки величины эффекта ОДП упростим выражения для  $en(x)$

$$en(x) \approx I \cdot m \cdot v_f / (2S_0 eU),$$

где взяты среднее значение потенциала в канале и средняя величина сечения, выраженная через  $S_0 = \pi \cdot r_0^2$ . Тогда

$$e\Phi(x) = eUx/L - gLx(1 - x/L)/2,$$

где  $g = 2\pi \cdot mv_f I / (S_0 U)$  — коэффициент, пропорциональный конечной проводимости канала. Пространственный заряд перераспределяет

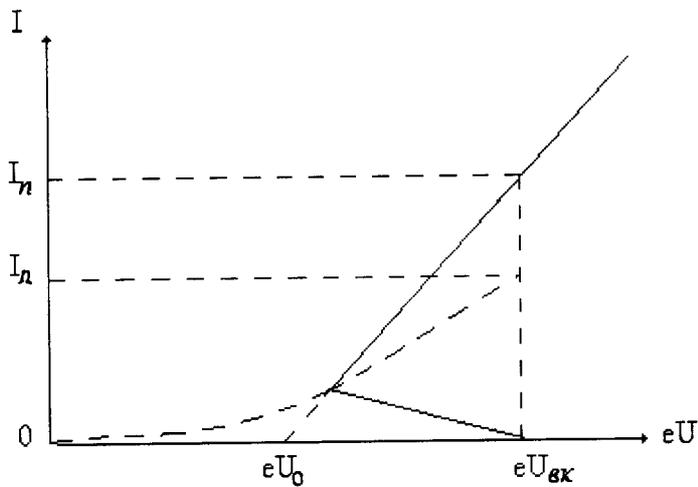


Рис. 2.

внешнее поле в канале, уменьшая его у эмиттера. При  $g \geq 2eU/L^2$  наблюдается немотонное распределение потенциала.

Если  $E_{10}(x)$  есть низший уровень энергии квантования в канале ( $E_{10} > E_f$ ), то он и определяет напряжение включения тока. При сделанных упрощениях, согласно (1)–(4), имеем

$$I = \frac{e\bar{D}}{\pi \cdot \hbar} \left\{ E_f - \frac{E_{10}(\tilde{x}_m)^{2\alpha}}{[\tilde{x}_m^\alpha + (\Delta/L)^\alpha]^2} + eU\tilde{x}_m - \frac{gL^2}{2}\tilde{x}_m(1 - \tilde{x}_m) \right\}, \quad (5)$$

$$\frac{2\alpha \cdot E_{10}(\tilde{x}_m)^{2\alpha-1}}{[\tilde{x}_m^\alpha + (\Delta/L)^\alpha]^3} \left( \frac{\Delta}{L} \right)^\alpha - eU + \frac{gL^2}{2}(1 - 2\tilde{x}_m) = 0, \quad (6)$$

$$\tilde{x}_m = x_m/L, \quad eU_{\text{вк}} \leq eU < eU_1,$$

где  $U_{\text{вк}}$  — напряжение включения тока в микроконтакте,  $U_1$  — напряжение включения следующей моды тока.

Можно показать, что система уравнений (5), (6) описывает S-образный участок ВАХ, если  $eU_{\text{вк}} > eU_0$  (рис. 2), т. е.

$$\frac{\alpha}{2} \left( \frac{\Delta}{L} \right)^\alpha > \frac{E_{10} - E_f}{E_{10}}$$

и  $I_{\text{л}}(eU_{\text{вк}}) < I_n(eU_{\text{вк}})$ , где

$$I_n = \frac{e\bar{D}}{\pi \cdot \hbar} (E_{10} - E_f) \left\{ \left( \frac{\alpha \cdot E_{10} (\Delta/L)^\alpha}{2(E_{10} - E_f)} \right)^{\frac{1}{\alpha+2}} - 1 \right\},$$

$$I_{\text{л}}(eU_{\text{вк}}) = \frac{S_0}{L^2 \pi \cdot emv_f} \left( \frac{L}{\Delta} \right)^2 (E_{10} - E_f)^2 \left( \frac{E_{10} - E_f}{2\alpha \cdot E_{10}} \right)^{2/\alpha}.$$

Величина участка ОДП по напряжению  $e\Delta U = eU_{\text{вк}} - eU_0$  максимальна, если  $\alpha = (L/\Delta)^{1/2}$ .

В заключение отметим, что для рассматриваемого механизма ОДП существенное значение имеют соотношения геометрических размеров канала при прочих неизменных параметрах и может наблюдаться многообразие ВАХ с ОДП на одних и тех же материалах.

## Список литературы

- [1] Вакулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1986. 295 с.
- [2] Волков А.Б., Неволин В.К. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 5. С. 1–3.
- [3] Неволин В.К. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 21. С. 57–60.
- [4] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1989. С. 90.