

ТОКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ПОЛУПРОВОДНИК—МЕТАЛЛ В КВАЗИОДНОМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Вакаров Б. С., Вакарова И. С., Корляков А. Б.,
Кравченко С. Н., Петухов А. Г.

Проведено исследование влияния Джоулевого разогрева на вид вольтамперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых резисторов, изготовленных на основе кремниевых структур с диэлектрической изоляцией. Теоретически определено аналитическое выражение для ВАХ в рамках квазиодномерной модели и показано, что S -образность связана с возникновением «домена» слабого поля при достижении температуры фазового перехода полупроводник—металл. Проводится сопоставление расчетных и экспериментальных ВАХ структур.

При создании СВИС методами субмикронной технологии представляется перспективным использование кремниевых структур с диэлектрической изоляцией (КСДИ), что позволяет повысить степень интеграции, исключить быстроедействие утечки [1]. Нами исследовались квазиодномерные КСДИ резисторы, т. е. структуры, у которых характерный поперечный размер намного меньше расстояния между контактами. Граница области безопасной работы КСДИ резисторов, как впрочем и других полупроводниковых приборов, определяется S -образностью вольтамперной характеристики (ВАХ), возникающей при Джоулевом разогреве. Интерпретация S -образности в этом случае основывается на представлениях о тепловом пробое, развивающемся при переходе к собственной проводимости в полупроводниковой фазе с последующим шнурованием тока [2]. Задача о возникновении и распространении волны фазового превращения полупроводник—металл рассматривалась в [3, 4] в условиях, когда фронт волны перпендикулярен напряженности электрического поля, а структура вдоль линий тока пространственно не ограничена (теплоотвод в контакты не учитывается). В данной работе будет показано, что в квазиодномерных, ограниченных контактами структурах S -образность ВАХ может быть связана с возникновением неоднородности «доменного» типа при Джоулевом разогреве, приводящем к фазовому переходу полупроводника в жидкое состояние внутри «домена». Для ряда полупроводников, в том числе для кремния, этот фазовый переход является переходом полупроводник—металл [5].

Рассмотрим квазиодномерную структуру, ограниченную контактами, примером которой является КСДИ резистор (рис. 1), исследованный нами экспериментально. Запишем одномерное стационарное уравнение теплопроводности для рассматриваемой системы

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{\alpha}{h} T - \rho(T) j^2, \quad (1)$$

где k — коэффициент теплопроводности, α — коэффициент теплоотдачи, h — отношение объема полупроводника к площади его боковой поверхности, T — температура, которая отсчитывается от температуры внешней среды. Второе слагаемое в (1), описывающее Джоулев разогрев полупроводника, выражено через плотность тока j , поскольку в структуре $j(x) = \text{const}$. Температурную зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ аппроксимируем с помощью модели

«размазанного» по температуре фазового перехода полупроводник—металл, отвечающего процессу плавления:

$$\begin{aligned} \rho(T) &= \rho_n \quad \text{при } T < T_0, \\ \rho(T) &= \rho_n - (\rho_n - \rho_m) \frac{T - T_0}{\Delta T} \quad \text{при } T_0 < T < T_0 + \Delta T, \\ \rho(T) &= \rho_m \quad \text{при } T > T_0 + \Delta T. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_n и ρ_m — удельные сопротивления полупроводниковой и металлической фаз соответственно, T_0 — температура начала перехода в жидкую фазу (плавление).

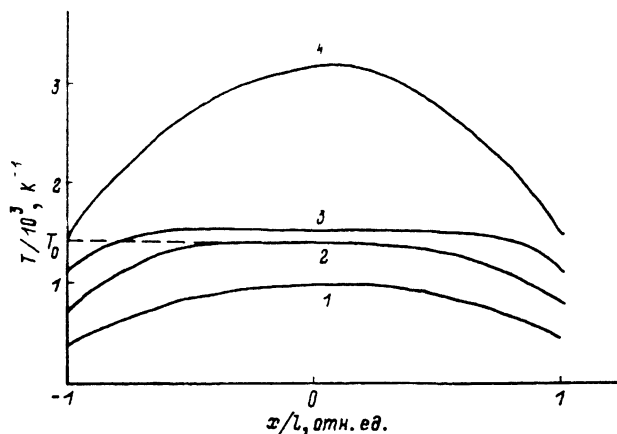
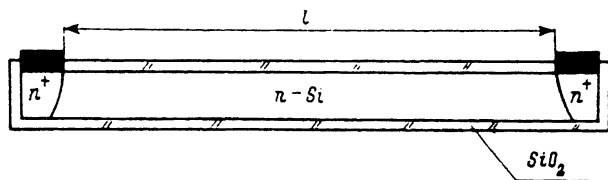


Рис. 1. Распределение температуры в квазиодномерной структуре ($l=10^{-4}$ м, $\alpha=10^4$ Вт/м²·К, $\mu=2.4 \cdot 10^4$ м⁻¹) при различных плотностях тока.

$j \cdot 10^{-2}$, А/м²: 1 — 1, 2 — 1.5, 3 — 3, 4 — 8.2. На вставке — схематическое изображение КСДИ резистора.

ния). При $\Delta T \rightarrow 0$ $\rho(T)$ является ступенчатой функцией, а фазовый переход — переходом первого рода [3]. Уравнение (1) будем решать со следующими граничными условиями на контактах:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=\pm l} = \mp \mu T |_{x=\pm l}, \quad (3)$$

где μ — относительный коэффициент теплообмена.

Полученные распределения $T(x)$ и связанные с ними $\rho(T(x))$ позволяют рассчитать ВАХ квазиодномерных структур. Рассмотрим фазовый переход первого рода, когда $\Delta T=0$, T_0 — температура плавления.

При плотностях тока

$$j^2 < \frac{\gamma T_0}{\rho_n} \frac{a}{a-1}, \quad (4)$$

где $a = \text{ch } \lambda l + \nu \text{ sh } \lambda l$, $\lambda = (\gamma/k)^{1/2}$, $\nu = \lambda/\mu$, $\gamma = \alpha/h$, распределение температуры является колоколообразным (рис. 1, кривая 1), а ВАХ линейной (рис. 2, кривая 1, участок I):

$$T(x) = \frac{\rho_n j^2}{\gamma} \left(1 - \frac{\text{ch } \lambda x}{a} \right), \quad (5)$$

$$U = 2l \rho_n j. \quad (6)$$

При увеличении плотности тока, когда

$$\frac{\gamma T_0}{\rho_n} \frac{a}{a-1} < j^2 < \frac{\gamma T_0}{\rho_m}, \quad (7)$$

$$T(x) = T_0, \quad |x| < |x_c|,$$

$$T(x) = \gamma^{-1} \{ \rho_n j^2 - (\rho_n j^2 - \gamma T_0) \operatorname{ch} [\lambda(x - x_0)] \}, \quad |x| > |x_c|, \quad (8)$$

где

$$x_c = l - \lambda^{-1} \operatorname{Arch} \frac{A_n - \nu (A_n^2 - \nu^2 - 1)^{1/2}}{1 - \nu^2}, \quad (9)$$

$$A_n = \rho_n j^2 (\delta_n j^2 - \gamma T_0)^{-1}.$$

Соответствующее этому случаю распределение температуры в структуре представлено на рис. 1 (кривая 2), а ВАХ (рис. 2, кривая 1, участок II) имеет вид

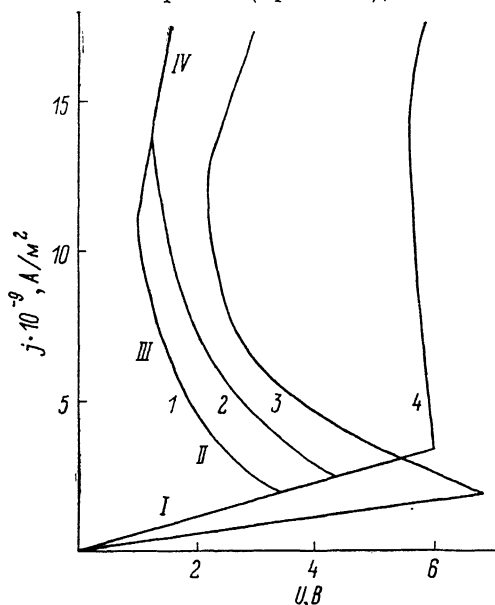


Рис. 2. Теоретические ВАХ различных квазиодномерных структур.

$$l_1 = l_2 = l_4 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad l_3 = 10^{-4} \text{ м}; \quad \alpha_1 = 10^4, \quad \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}; \quad \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 2.4 \cdot 10^4, \quad \mu_4 = 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}.$$

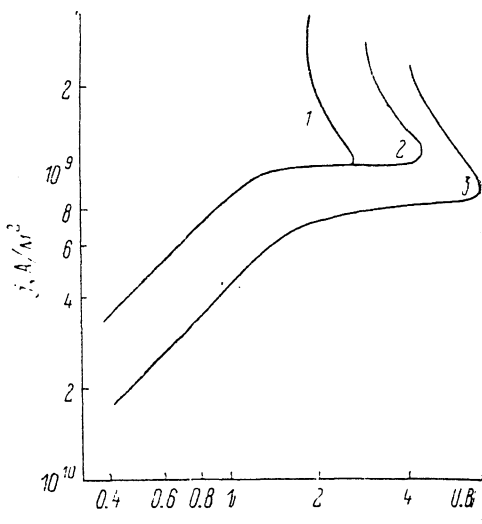


Рис. 3. Квазистатические ВАХ КСДИ резисторов.

$$\text{Параметры: } l_1 = l_2 \approx 5 \cdot 10^{-5}, \quad l_3 = 10^{-4} \text{ м; толщина слоя SiO}_2 \text{ } d_1 \approx 2.5 \cdot 10^{-6}, \quad d_2 = d_3 \approx 10^{-6} \text{ м}.$$

$$U = 2j \left[\rho_n (l - x_c) + \frac{\gamma T_0}{j^2} x_c \right]. \quad (10)$$

ВАХ на участке II отвечает образованию в центре токового канала домена слабого поля длиной x_c , температура в котором $T(x) = T_0$, а удельное сопротивление ρ_c :

$$\rho_n > \rho_c = \frac{\gamma T_0}{j^2} > \rho_m. \quad (11)$$

Неравенство (11), очевидно, свидетельствует о сосуществовании внутри домена твердой и жидкой фаз. Отметим, что при выполнении равенства (10) дифференциальное сопротивление является отрицательным, и, следовательно, условие (7) определяет возникновение токовой неустойчивости.

Плотностям тока в интервале

$$\frac{\gamma T_0}{\rho_m} < j < \frac{\gamma T_0}{\rho_m} \frac{a}{\nu \operatorname{sh} \lambda l} \quad (12)$$

соответствует распределение температуры (рис. 1, кривая 3)

$$T(x) = \gamma^{-1} \left[\rho_{\text{ж}} j^2 - (\rho_{\text{ж}} j^2 - \gamma T_0) \frac{\text{ch } \lambda x}{\text{ch } \lambda x_0} \right] \quad \text{при } |x| < |x_0|, \quad (13)$$

$$T(x) = \gamma^{-1} \left\{ \rho_{\text{п}} j^2 - (\rho_{\text{п}} j^2 - \gamma T_0) \frac{\text{ch } [\lambda (x - x_0)]}{\text{ch } [\lambda (x_0 - x_0)]} \right\} \quad \text{при } |x| > |x_0|.$$

Здесь параметр x_0 определяется из условия «сшивки» (непрерывности $\partial T / \partial x$) при $x = x_0$ и связан с размером жидкометаллического домена x_0 соотношением

$$\text{th } \lambda x_0 = \frac{\rho_{\text{п}} j^2 - \gamma T_0}{\rho_{\text{ж}} j^2 - \gamma T_0} \text{th } \lambda (x_0 - x_0),$$

а сам размер домена определяется из граничных условий (3), которые приобретают с учетом (13) следующий вид:

$$1 + \nu \text{th } \lambda y + \frac{\rho_{\text{п}} j^2 - \gamma T_0}{\rho_{\text{ж}} j^2 - \gamma T_0} (\nu + \text{th } \lambda y) \text{th } [\lambda (l - y)] = \frac{A_{\text{п}}}{\text{ch } \lambda y},$$

где $y = l - x_0$. ВАХ (рис. 2, кривая 1, участок III) описывается уравнением

$$U = 2j \{ \rho_{\text{п}} |l - x_0(j)| + \rho_{\text{ж}} x_0(j) \}. \quad (14)$$

Из (14) видно, что на участке III домен является уже чисто металлическим. Наконец, при

$$j^2 > \frac{\gamma T_0}{\rho_{\text{ж}}} \frac{a}{\nu \text{sh } \lambda l} \quad (15)$$

размер жидкометаллического домена равен расстоянию между контактами и ВАХ (рис. 2, кривая 1, участок IV) становится омической, а удельное сопротивление в канале равным $\rho_{\text{ж}}$. Распределение температуры (рис. 1, кривая 4) и ВАХ задаются выражениями (5) и (6), в которых $\rho_{\text{п}}$ следует заменить на $\rho_{\text{ж}}$.

Отметим, что участок II может не реализоваться на ВАХ, если параметры структуры таковы, что условие

$$\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} > \frac{a}{a - 1} \quad (16)$$

не выполняется. В этом случае S-образность ВАХ будет наблюдаться только за счет возникновения жидкометаллического домена на участке III.

В качестве модельной структуры для экспериментов нами были использованы КСДИ резисторы не только в связи с возможностью изготовления их квазиодномерными. Наличие оболочки из окисла кремния, а также геометрия образцов позволяют измерять квазистатические ВАХ и после образования жидкометаллической фазы. Предельные величины тока при этом ограничены достижением в кремнии температуры плавления SiO_2 , а также процессами разрушения металлических (Al) контактов за счет их испарения или электростимулированного движения «островков» металлизации по поверхности структуры.

Отметим, что наблюдающееся различие форм теоретических (рис. 2) и экспериментальных (рис. 3) ВАХ связано с упрощающими предположениями, использованными нами, как и авторами [3, 4], при записи уравнения теплопроводности. В (1) параметры k , α , $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ не зависят от температуры, причем $\rho_{\text{п}}$ не зависит и от напряженности электрического поля E . Понятно, что исключение из рассмотрения зависимости $\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{п}}(E, T)$, например, определяет отсутствие на ВАХ участков, обусловленных насыщением дрейфовой скорости $\nu(E)$ и сменной механизма токопереноса при Джоулевым разогреве кремния (переход от примесной проводимости к собственной в твердой фазе, что обычно определяет S-образность ВАХ).

Тем не менее из сравнения зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, видно, что расчетные и экспериментальные значения тока $J_{\text{одп}}$ и напряжения $U_{\text{одп}}$ близки между собой. С расчетной зависимостью $x_0(j)$ согласуется и наблюдающаяся зависимость длины рекристаллизованных областей кремния в КСДИ резисторах от величины стационарного тока. Кроме того, изменение расчетных ВАХ (рис. 2, кривые 1, 2) при увеличении теплоотода через боковую поверх-

ность соответствует характеру изменения экспериментальных ВАХ (рис. 3, кривые 1, 2) при уменьшении толщины слоя окисла на кремнии (увеличение $J_{\text{ОДП}}$ и $U_{\text{ОДП}}$ с одновременным увеличением интервалов по току $\Delta j_{\text{ОДП}}$ и напряжению $\Delta U_{\text{ОДП}}$ участка ВАХ с ОДП). На экспериментальной ВАХ, если увеличить длину токового канала КСДИ резистора, переход к участку ОДП происходит при меньших $j_{\text{ОДП}}$ и больших $U_{\text{ОДП}}$ при увеличении $\Delta j_{\text{ОДП}}$ и $\Delta U_{\text{ОДП}}$ (рис. 3, кривые 2, 3), что также качественно согласуется с характером изменения расчетных ВАХ (рис. 2, кривые 2, 3).

Полученные результаты позволяют говорить о том, что в ограниченных квазидномерных структурах S-образность связана не только со сменой механизма проводимости в твердой фазе полупроводника [2], но и с развитием токовой неустойчивости, обусловленной возникновением «домена» слабого поля при достижении в нем температуры фазового перехода полупроводник—металл.

Список литературы

- [1] Таруи Я. Основы технологии сверхбольших интегральных схем. М., 1985. 480 с.
- [2] Волков А. Ф., Коган Ш. М. // УФН. 1968. Т. 96. В. 4. С. 633—672.
- [3] Калафати Ю. Д., Сербинов И. А., Рябова А. Л. // Письма ЖЭТФ. 1979. Т. 29. В. 10. С. 637—641.
- [4] Архипов В. И., Головицын В. А., Ольган А. С. // Математическое моделирование и экспериментальное исследование электрической релаксации в элементах интегральных схем. М., 1984. С. 25—30.
- [5] Регель А. Р., Глазов В. М. Физические свойства электронных расплавов. М., 1980. 296 с.

Одесский

государственный университет
им. И. И. Мечникова

Получена 14.06.1988

Принята к печати 22.02.1989