

УДК 621.315.592

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОКОПЕРЕНОСА В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ— p^+ — n -ПОЛУПРОВОДНИК С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ

Бузанева Е. В., Ветров А. П., Кузнецов Ю. М.,
Левандовский В. Г., Панасюк В. М., Попова Г. Д.

Проведено физическое моделирование токопереноса в структурах металл— p^+ — n -полупроводник с глубокими уровнями (ГУ) и предложена дифференциальная методика исследования с использованием машинного эксперимента, позволяющая изучить особенности в токопереносе.

Приведены значения энергетического положения четырех ГУ, обнаруженных с помощью предложенной методики в структурах Al— p^+ — n -Si, применяемых в микроэлектронике.

Модификация характеристик структур металл—полупроводник и других структур на полупроводниках при введении глубоких примесей в полупроводник может быть обусловлена влиянием на токоперенос перезаполнения возникающих в полупроводнике глубоких уровней (ГУ) и генерационно-рекомбинационных процессов [1, 2]. В данной работе проведено физическое моделирование токопереноса в структурах металл— p^+ — n -полупроводник с ГУ и предложена дифференциальная методика исследования с проведением компьютерного эксперимента, позволяющая изучить особенности в токопереносе.

Ф и з и ч е с к о е м о д е л и р о в а н и е т о к о п е р е н о с а в с т р у к т у р а х м е т а л л — p^+ — n - п о л у п р о в о д н и к б а р ь е р о м Ш о т т к и

На рис. 1 приведена зависимость хода потенциала φ от пространственной координаты x в полупроводнике структур металл— p^+ — n -полупроводник при изменении напряжения U . В полупроводнике учтены ГУ — одна «строчка» уровней с энергетическим положением ϵ_i . При небольшом напряжении в прямом направлении уровень Ферми пересекает строчку ГУ только справа от x_{\max} (в точке x_2), что соответствует заполнению ГУ в области $x \geq x_2$. При увеличении напряжения до $U = U_{it}$ начинается одновременное заполнение ГУ в области максимального потенциала слева и справа от x_{\max} , при этом уровень Ферми пересекает строчку ГУ в точках x_1 и x_2 и при $U = U_{it}$ выполняется условие

$$\varphi_0 - eU_{it} = \mu - \epsilon_i. \quad (1)$$

При напряжении U_i заполнение глубокого уровня прекращается и выполняется условие

$$\varphi_{\max}(U_i) = \mu - \epsilon_i. \quad (2)$$

Возможность перезаполнения ГУ слева и справа от x_{\max} является особенностью структуры металл— p^+ — n -полупроводник и в отличие от результатов [3] приводит к нерегулярности в зависимостях дифференциального наклона вольт-амперной характеристики (ВАХ) α (α^*) от напряжения.

Как показано в ряде работ [1], особенность структур металл— p^+ — n -полупроводник (в частности, Al— p^+ — n -Si) с ГУ, связанной с технологией изготовления этих структур и высоким «эффективным» барьером на границе ($\varphi_m \sim 0.6$ эВ), является преобладание генерационно-рекомбинационного тока i_{gr} по сравнению с надбарьерным током i_0 . Так, в исследуемой здесь структуре отношение

$$\frac{i_{gr}}{i_0} \sim \frac{n_i D}{n_0 v \tau} e^{\frac{\varphi_m}{kT}} > 10^2$$

при $n_0 = 10^{16}$ см $^{-3}$, $n_i = 10^{10}$ см $^{-3}$, $\varphi_m \sim 0.6$ эВ, $\tau < 10^{-3}$ с ($1/\tau$ — вероятность рекомбинации).

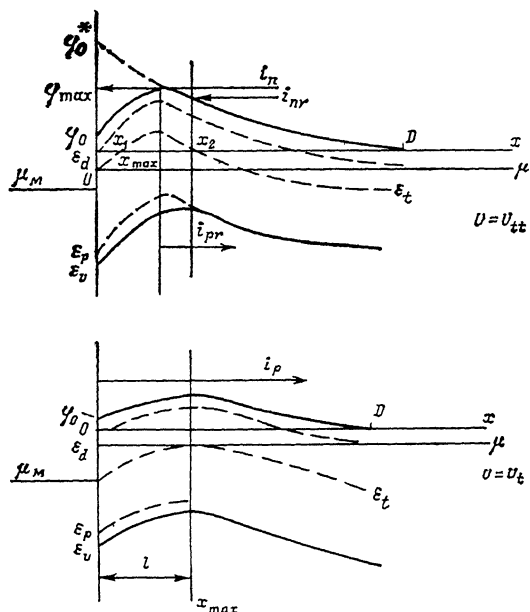


Рис. 1. Зависимость потенциала φ от пространственной координаты x в структуре металл— p^+ — n -полупроводник при изменении напряжения U .

Сплошная кривая — ход потенциала в полупроводнике; штриховая — энергетическое положение примесных уровней.

Расчет ВАХ для генерационно-рекомбинационного тока сводится к нахождению интеграла:

$$i_{gr} = e \int_0^D [n(x)p(x) - n_i^2] [\tau_p n_p + \tau_n p_1 + \tau_p n(x) + \tau_n p(x)]^{-1} dx = e^* [n_i(D)p(D) - n_i^2] I, \quad (3)$$

где

$$I = \int_0^D [A + B(x)]^{-1} dx,$$

$$A = \tau_n p_1 + \tau_p n_1, \quad p_1 = n_i \exp[(\varepsilon_i - \varepsilon_s)/kT],$$

$$n_1 = n_i \exp[(\varepsilon_i - \varepsilon_s)/kT],$$

$$B = \tau_n p(D) \exp[\varphi(x)/kT] + \tau_p n_0 \exp[-\varphi(x)/kT],$$

n_i и ε_s — концентрация электронов и уровень Ферми в собственном полупроводнике, τ_n и τ_p — времена жизни неравновесных носителей заряда электронов и дырок соответственно [1]. Анализ (3) показывает, что усложнение ВАХ по сравнению с результатами, приведенными в [3], связано с тем, что: 1) в структурах металл— p^+ — n -полупроводник существуют две (а не одна) области максимального вклада в генерационно-рекомбинационный ток (слева и справа от x_{max}

где $\tau_p n = \tau_n p$; 2) положение областей максимального вклада сложным образом зависит от напряжения.

Необходимо отметить, что расчет i_{gr} (3) связан с нахождением зависимостей $p(x)$ и $n(x)$ в приближениях диодной [3] и диффузионной теорий при различных уровнях инжекции в p^+ -слое [5, 6]. Как показано в [3, 6], в случае диодной теории (что соответствует рассматриваемой здесь модели) при выполнении условия $e/v\tau \ll 1$ (l — длина свободного пробега), что опять же соответствует $\tau < 10^{-3}$ с для исследуемых здесь образцов, функция распределения носителей при отсутствии вырождения в области пространственного заряда (ОПЗ) будет больцмановского типа: $n(x) = n_0 \exp(-\varphi(x)/kT)$, $p(x) = p(D) \exp(\varphi(x)/kT)$. В этом случае произведение $n(x)p(x)$ в (3) не зависит от координаты, а $p(D) =$

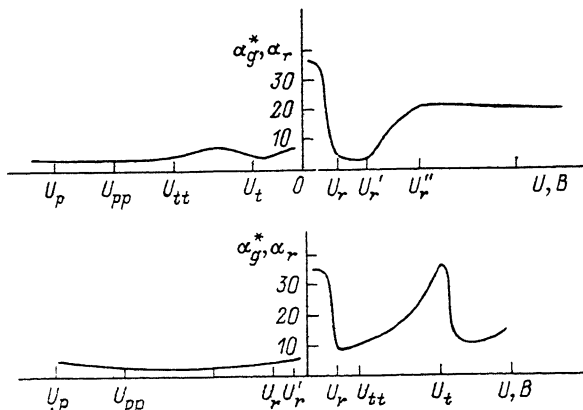


Рис. 2. Теоретическая зависимость $\alpha (\alpha^*) = f(U)$ при генерационно-рекомбинационном токе для различных энергий ионизации ϵ_i глубоких уровней.

$= p_0 + \Delta p$ с учетом условий переноса дырок в контакте с p^+ -слоем [5, 6] по-разному зависит от напряжения в областях $U \leq \varphi_0/e$ и $U > \varphi_0/e$. При $U \leq \varphi_0/e$

$$p(D) = p_0 [v_p \exp(eU/kT) + 4\Theta_p/L_p] [4\Theta_p/L_p + v_p]^{-1}. \quad (4)$$

При $U > \varphi_0/e$

$$p(D) = p_0 [v_p \exp(\varphi_0/kT) + 4\Theta_p/L_p] \{4\Theta_p/L_p + v_p \exp[(\varphi_0 - eU)/kT]\}^{-1}, \quad (5)$$

где v_p — средняя скорость дырок в полупроводнике, Θ_p и L_p — коэффициент и длина диффузии для дырок соответственно.

Учитывая зависимость $\varphi(x)$, интегрирование (3) проведем в двух областях — слева и справа от x_{\max} , вынося из-под знака интеграла среднее значение функции $(d\psi/dx)^{-1}$. В результате получим

$$i_{gr} = e [n_0 p(D) - n_i^2] \{ [x_{\max} [\varphi_{\max} - \varphi(0)]^{-1} + (D - x_{\max})/\varphi_{\max}] F(\varphi_{\max}) - x_{\max} \times \\ \times [\varphi_{\max} - \varphi(0)]^{-1} F[\varphi(0)] - (D/x_{\max})/\varphi_{\max} F_1(0) \}, \quad (6)$$

где $F(\varphi)$ — функция, зависящая от ϵ_i , φ_0^* , τ_n , τ_p , U :

$$F(\varphi) = kT [A^2 - 4\tau_n \tau_p p(D) n_0]^{1/2} \ln \{ 2\tau_n p(D) \exp(\varphi/kT) + A - \\ - [A^2 - 4\tau_n \tau_p p(D) n_0]^{1/2} \} \{ 2\tau_n p(D) \exp(\varphi/kT) + A + [A^2 - 4\tau_n \tau_p p(D) n_0]^{1/2} \}^{-1} \quad (7)$$

при $A^2 > 4\tau_n \tau_p p(D) n_0$;

$$F(\varphi) = 2kT [4\tau_n \tau_p p(D) n_0]^{-1/2} \operatorname{arctg} \{ [2\tau_n p(D) \exp(\varphi/kT) + A] [4\tau_n \tau_p p(D) n_0 - A^2]^{-1/2} \} \quad (8)$$

при $A^2 < 4\tau_n \tau_p p(D) n_0$.

Из выражений (6)–(8) видно, что для зависимости $i_{gr}(U)$ можно ввести характерные напряжения U_r , U_r' и U_r'' (рис. 2). При U_r происходит переход от ВАХ типа (6), (7) к ВАХ вида (6), (8). U_r определяют из уравнения

$$0.5U_p/kT = \ln 0.5 (\tau_n/\tau_p)^{1/2} + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)/kT + \ln \{1 + (\tau_p/\tau_n) \exp [2(\varepsilon_i - \varepsilon_j)/kT]\}. \quad (9)$$

Так как при напряжении $U > U_r$ в выражении (6) определяющим является член с F (φ_{\max}), то для U'_r и U''_r можно записать следующие выражения:

$$[eU'_r + \varphi_{\max}(U'_r)]/kT = (\mu - \varepsilon_i)/kT + \ln \{1 + (\tau_p/\tau_n) \exp [2(\varepsilon_i - \varepsilon_j)/kT]\}; \quad (10)$$

$$0.5 eU'_r/kT = [(\mu - \varepsilon_i)/kT] - [\varphi_{\max}U'_r/kT] + \ln 2 (\tau_p/\tau_n)^{1/2}. \quad (11)$$

Основные особенности ВАХ при генерационно-рекомбинационном механизме прохождения тока рассмотрим по зависимостям $\alpha_r(U) = (d/dU) (\ln i_r)$ и $\alpha_g^*(U) = (d/dU) (\ln i_g)$, учитывая (6)–(11). Возможны следующие частные случаи:

$$d_r \approx e/kT \quad (12)$$

при $U < U_r$, $U_r \geq 0$,

$$\alpha_g^* = (D'/D) - (\varphi'_{\max}/\varphi_{\max}) - (e/kT) \{ \ln [A^2 (\tau_p \tau_n n_i^2)^{-1}] - (eU/kT) \}^{-1} \quad (13)$$

при $U_{pp} < U < U_r$, где D' и φ'_{\max} определяются из

$$D' = (e/kT) l_a^2 [(1 - n_i) D + n_i x_2]^{-1}, \quad (14)$$

$$-\varphi'_{\max}/kT = (e/kT) \{1 - x_{\max} [(1 - n_i) D + n_i x_2]^{-1}\}, \quad l_a = (\varepsilon/kT)^{1/2} (4\pi l^2 n_a)^{-1/2}, \quad (15)$$

n_a — концентрация мелких доноров в полупроводнике. При увеличении напряжения до $U \gg U_r$,

$$\alpha_r = e/2kT \quad (16)$$

при $U < U_{ii}$, $U > U_i$, $U_r < U < U'_r < U''_r$,

$$\alpha_r \approx (e/kT) (x_{\max}/D) \quad (17)$$

при $U < U_{ii}$, $U > U_i$, $U_r < U'_r < U''_r < U$, $U > U_r > U''_r > U'_r$.

Если напряжение изменяется в области $U_{ii} < U < U_i$; $U_r \leq U_{ii}$, $U > U''_r > U'_r$, то $\alpha_r(U)$ будет возрастать:

$$\alpha_r = e/kT (1 + d\varphi_{\max}/dU). \quad (18)$$

В интервале напряжений для (18) φ'_{\max} определяется из уравнения

$$-\varphi'_{\max}/kT = (e/kT) \{1 - [n_i x_1 x'_1/D' + x_{\max} (1 - n_i + n_i x'_2/D')][(1 - n_i) D - n_i (x_2 x'_2/D' + x_1 x'_1/D')]^{-1}\}, \quad (19)$$

и α увеличивается до $\alpha = e/kT$ при $U = U_i$, когда $\varphi'_{\max} = 0$, x'_1 , x'_2 , D' — скорости изменения параметров x_1 , x_2 , D с изменением напряжения:

$$x'_1 = -D' [(1 - n_i)(D - x_1) + n_i (x_2 - x_1) x'_2/D'] [(1 - n_i)(D - x_1) + n_i (x_2 - x_1) - n_p (l - x_1)]^{-1}; \quad (20)$$

$$x'_2 = D' [1 - n_p (l - x_2) (1 - n_i)^{-1} (D - x_2)^{-1}]^{-1} \quad (21)$$

при $x_2 \leq l$;

$$D' = (e/kT) l_a^2 \{ (1 - n_i) D + n_i [(x_2 x'_2/D') - (x_1 x'_1/D')] \}^{-1}, \quad (22)$$

где n_p , l — концентрация мелких акцепторов в p^+ -слое и его толщина соответственно

$$D = l_a \sqrt{2(1 - n_i)^{-1} [(\varphi_0^* - eU)/kT + 0.5 x_2^2 l_a^{-2}]}. \quad (23)$$

При увеличении напряжения до $U > U_{ii}$, если $U_r < U < U'_r < U''_r$, то $\alpha_r = 0$. Теоретические зависимости α (α^*) = $f(U)$ для различных значений энергий ионизации ГУ приведены на рис. 2.

Методика эксперимента

Для определения особенностей токопереноса в структурах металл— p^+ — n полупроводник разработана методика измерения дифференциальных характеристик структур α , $\alpha^*(U)$, $R_g(U)$. Исследования этих характеристик приведены с помощью компьютерного эксперимента на автоматизированной установке

с персональной ЭВМ «Искра-1030» (рис. 3). Напряжение на исследуемую структуру, помещенную в криостат 9, подается с генератора пилообразного напряжения 3. Напряжение на структуре, ток через нее и температура измеряются цифровыми измерительными приборами 4–6 типа ЦУИП. Управление режимом работы ЦУИПов и сбор информации с них осуществляются по программе с ЭВМ через устройство сопряжения (УС) 2. Программа подбирает необходимые диапазоны измерения, формирование массивов, рассчитывает R_g , α , α^* и осуществляет построение графических зависимостей на экране дисплея.

Для повышения точности измерения токов в разработанной установке применены интегрирование показаний измерительных приборов, уменьшение времени считывания этих показаний, программный выбор режима измерений. Уменьшение погрешности, обусловленной дрейфом температуры в установленной точке измерения, достигается уменьшением времени измерения ВАХ и скорости изменения температуры.

При расчете α , α^* , R_g применено численное дифференцирование. Точность расчета α , α^* зависит от выбора шага дифференцирования ΔU и может быть повышена схемным путем. Шаг $\Delta U \approx kT/e$ сформировавшись с большой точностью (0.05 %) независимой схемой и может дополнительно прикладываться к структуре в каждой точке измерения ВАХ.

Разработанная автоматизированная установка характеризуется следующими параметрами: пределы измерения тока $10^{-11} \div 10^{-1}$ А с точностью 0.05 %, скорость измерений $1 \div 25$ с $^{-1}$; пределы измерения R_g — $10^3 \div 10^8$ Ом с точностью $1 \div 2$ %, пределы измерения α — $0.3 \div 60$ В $^{-1}$ с точностью $0.5 \div 1$ %.

Одним из основных устройств автоматизированной установки, позволяющим получить такие параметры, является устройство сопряжения ЭВМ с измерительными приборами. Блок-схема устройства приведена на рис. 4. В устройство входят шинные формирователи 2 для подключения к информационной шине ЭВМ, селектор адреса и формирователь командных сигналов 3, схема управления режимом работы измерительных приборов 4, схема ввода информации в ЭВМ 5. При построении устройства использован принцип программного обмена информацией между измерительными приборами и ЭВМ. Схемы ввода информации оригинальны, характеризуются большой скоростью обмена информацией, помехозащищенностью, позволяют упростить программу обеспечения обмена и значительно сократить число физических связей между измерительными приборами и ЭВМ.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследуемые структуры Al-p $^+$ -n-Si изготовлены на кремнии КЭФ-0.3. Перед напылением алюминия поверхность кремния травилась в плазме при мощности разряда 0.6 кВт. Температура отжига структур $T_0 = 573$ и 733 К. Площадь структур $S = 1.65 \times 10^{-3}$ см. Для этих структур измерены ВАХ, по которым рассчитаны параметры α , α^* в зависимости от напряжения при $T = 77$ К (рис. 5). Из рис. 5 видно, что зависимости $\alpha(U)$, $\alpha^*(U)$ сложные и характеризуются наличием максимумов и минимумов при фиксированных напряжениях.

Для структур, отожженных при $T_0 = 573$ К, в интервале напряжений 0.1–0.6 В в прямом направлении наблюдаются минимумы при $U_{\text{нп}} = 0.23, 0.35, 0.42$ В.

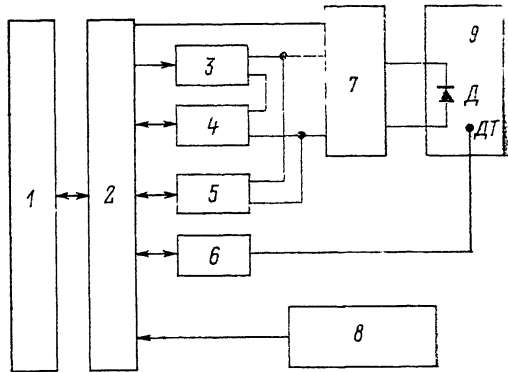


Рис. 3. Блок-схема измерительной установки. 1 — ЭВМ; 2 — устройство сопряжения; 3 — генератор пилообразного напряжения; 4–6 — цифровой измерительный прибор типа ЦУИП; 7 — переключатель; 8 — выносной пульт управления установкой; 9 — криостат; Д — исследуемая структура; ДТ — датчик температуры.

а в интервале напряжений от 0 до -2 В в обратном направлении — при $U_{tt} = -0.6$ В.

Так как при $U = U_{tt}$ начинается заполнение ГУ и уровень Ферми пересекает ГУ, то три минимума на зависимости $\alpha(U)$ обусловлены тремя строчками ГУ, расположенными выше уровня Ферми, а один минимум на зависимости $\alpha^*(U)$ — одной строчкой ГУ ниже уровня Ферми. Количество минимумов на зависимостях α , $\alpha^*(U)$, т. е. количество строчек ГУ, уменьшается при повышении темпера-

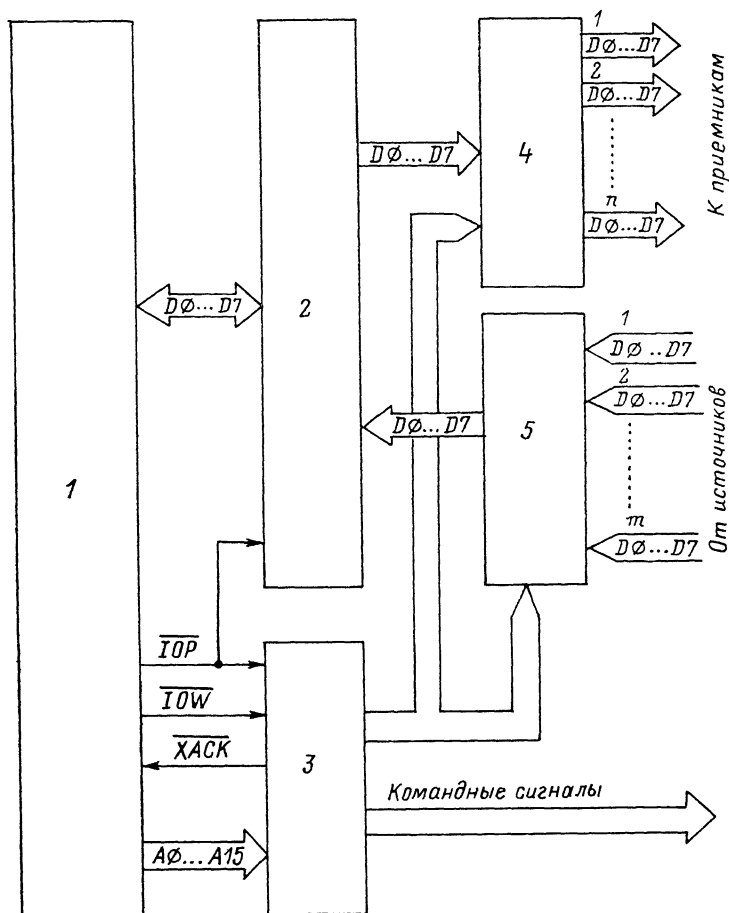


Рис. 4. Блок-схема устройства сопряжения ЭВМ с измерительными приборами.

1 — ЭВМ; 2 — шинные формователи; 3 — селектор адреса и формователь командных сигналов; 4 — блок регистров; 5 — коммутатор вводимой информации.

туры отжига до $T_0 = 733$ К. При этой температуре на зависимости $\alpha(U)$ имеется только один минимум (одна строчка ГУ), что свидетельствует об отжиге при 733 К остальных ГУ.

На основании анализа зависимостей $\alpha_r(U)$ и $\alpha_g^*(U)$ [формулы (13), (18) и условие (1)] проведена оценка энергетического положения ГУ ϵ_i в запрещенной зоне Si по отношению к ϵ_c при $U > 0$ и к ϵ_v при $U < 0$. При оценке ϵ_i использовано значение $\varphi_0 = 0.15-0.25$ эВ, определенное по отсечке на оси U прямой $C^{-2}(U)$ при больших обратных напряжениях, когда все ГУ в области пространственного заряда кремния ионизированы.

Значения ϵ_i для структур $Al-p^+-n-Si$, оцененные по (1), приведены в таблице. Из таблицы видно, что при $T_0 = 573$ К в структурах $Al-p^+-n-Si$ в процессе их изготовления формируются четыре строчки ГУ. При повышении T_0 до 733 К остается только одна строчка ГУ, а остальные отжигаются. ГУ с $\epsilon_c - \epsilon_{i1} = 0.15-0.16$ эВ связан с комплексом вакансии-кислород [4]; ГУ с $\epsilon_c - \epsilon_{i2} = 0.22-0.24$ эВ — с примесью титана в кремнии [5], ГУ с $\epsilon_c - \epsilon_{i3}$ может

быть обусловлен комплексом вакансия—примесь [1], а с $\epsilon_v + \epsilon_{t4}$ — междуузельным атомом [6].

Уровни с $\epsilon_c - \epsilon_{t2}$ и $\epsilon_c - \epsilon_{t3}$ были обнаружены в кремнии и другими методами, в частности, методом DLTS в [7] для структур TiW—*n*-Si и определено, что они вводятся в процессе магнетронного распыления металлов.

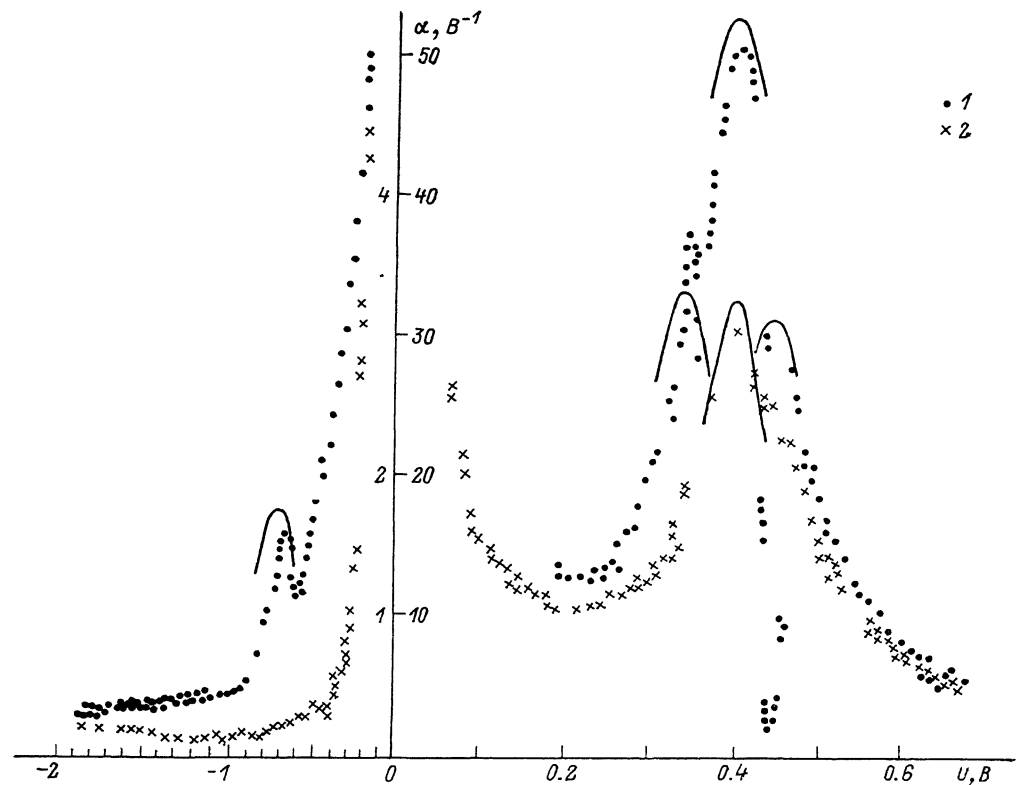


Рис. 5. Зависимости α , α^* от напряжения.

Сплошные кривые — расчет по формулам (13) и (18), точки — эксперимент; T_0 , К: 1 — 573, 2 — 733.

Рассчитанные по формулам (13) и (18) зависимости $\alpha(U)$ и $\alpha^*(U)$ (сплошные линии на рис. 5) с учетом значений ϵ_t , приведенных в таблице, хорошо описывают экспериментальные зависимости $\alpha(U)$, $\alpha^*(U)$ (точки на рис. 5), что может служить подтверждением генерационно-рекомбинационного токопереноса в структурах Al—*p*⁺—*n*-Si.

T_0 , К	$\epsilon_c - \epsilon_{t1}$, эВ	$\epsilon_c - \epsilon_{t2}$, эВ	$\epsilon_c - \epsilon_{t3}$, эВ	$\epsilon_v + \epsilon_{t4}$, эВ
573	0.15 ÷ 0.16	0.22 ÷ 0.24	0.31 ÷ 0.33	0.7 ÷ 0.72
733	0.15 ÷ 0.16	—	—	—

Таким образом, высокая чувствительность и точность дифференциальной методики исследования структур металл—*p*⁺—*n*-полупроводник позволили экспериментально обнаружить особенности токопереноса в структурах Al—*p*⁺—*n*-Si, связанные с генерационно-рекомбинационным механизмом прохождения тока, выявить ГУ и определить их энергетическое положение в запрещенной зоне кремния.

Список литературы

- [1] Стриха В. И., Бузанева Е. В. Физические основы надежности контактов металл—полупроводник в интегральной электронике. М., 1987. 22 с.
- [2] Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана. М., 1988. 223 с.
- [3] Левандовский В. Г., Стриха В. И., Чайка Г. Е. // Радиотехника и электроника, 1980. С. 847—855.
- [4] Левандовский В. Г., Стриха В. И., Чайка Г. Е. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. 1980. № 32. С. 95—104.
- [5] Бузанева Е. В., Левандовский В. Г., Стриха В. И. // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. В. 7. С. 1403—1408.
- [6] Бузанева Е. В., Вдовиченко А. Д., Левандовский В. Т. и др. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1983. № 4 (163). С. 15—23.
- [7] Кулаков В. М., Ладыгин Е. А., Шаховцов В. И. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Ладыгина Е. А. М., 1980. 44 с.
- [8] Омеляновский Э. И., Фистуль В. И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. М., 1983. 37 с.
- [9] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977. 122 с.
- [10] Auret F. D., Nel M., Wojarczuk N. A. // J. Vac. Sci. Techn. 1985. V. 4. N 5. P. 1168—1174.

Получена 20.09.1990
Принята к печати 19.02.1991
