

ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРОВ ПРИЛИПАНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ p - n -ДИОДОВ

Г. М. АВАКЬЯНЦ, А. У. РАХИМОВ

Исследовано влияние уровней прилипания на вольт-амперную характеристику полупроводникового диода с омическим тыловым контактом. Получены формулы для различных участков и полного хода вольт-амперной характеристики. Анализируются характеристики и дифференциальные сопротивления переходных областей, соответствующих разным значениям параметров диода и ловушек. Приводятся графические изображения этих характеристик.

В отличие от [1] отмечается отсутствие участка отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике.

Указывается причина различия результатов.

В работе [1] исследуется влияние уровней прилипания на вольт-амперную характеристику (ВАХ) $R-p-n-p^+-R$ -структуры. Автор этой работы утверждает, что с ростом степени заполнения ловушек носителями (при постоянном времени жизни) на ВАХ появляется отрицательный участок. Однако в своих исследованиях Ламперт [2, 3] показал, что для достаточно длинных диодов влияние уровней прилипания приводит к почти вертикальному участку вольт-амперной характеристики (закон предельного заполнения ловушек). В работе [4] было исследовано влияние центров прилипания на диффузию носителей в диодах с двойной инжекцией и показано, что при этом не имеет места падающая характеристика.

В настоящей работе мы исследуем влияние уровней прилипания для дырок на ВАХ p - n -диода с омическим тыловым контактом.

1. Постановка задачи.

Дифференциальное уравнение и его решение

Произведем расчет для известной модели диода с омическим тыловым контактом [5], база которого содержит кроме мелких уровней еще один уровень прилипания для дырок. Причем время жизни дырок считаем постоянным, а условие квазинейтральности имеет вид

$$n = p + N_g + \frac{p}{p + p_0} N_0. \quad (1)$$

Рассмотрим две области в базе, для которых (1) примет вид

$$\text{I} \quad p < p_0, \quad n = \theta p + N_g, \quad (2)$$

$$\text{II} \quad p > p_0, \quad n = p + \delta N_g, \quad (3)$$

где

$$p_0 = \frac{\alpha}{\beta}; \quad \theta = \frac{N_0}{p_0} + 1; \quad \delta = \frac{N_0}{N_g} + 1.$$

Считаем, что

$$N_0 > N_g. \quad (4)$$

Так как время жизни дырок для обеих областей одинаково, то дифференциальное уравнение имеет следующий вид [4] (когда диффузия носителей преобладает над их дрейфом):

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p - p_n^0}{L^2} = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) имеет вид

$$p(x) = p_n^0 + Ae^{-\frac{x}{L}} + Be^{\frac{x}{L}}. \quad (6)$$

Постоянные A и B определяются граничными условиями

$$x=0, \quad p(0) = p_n^0 e^{\frac{qV_{pn}}{kT}}, \quad x=d, \quad p(d) = p_n^0. \quad (7)$$

Границу раздела между областями определим из условия

$$p(x_0) = p_0, \quad (8)$$

что дает следующее выражение для x_0 :

$$x_0 = d - L \operatorname{Arsh} \frac{j_0}{j}, \quad (9)$$

где

$$j_0 = j_{\text{гр}} \operatorname{sh} \frac{d}{L}; \quad j_{\text{гр}} = qD_p \beta_1 \operatorname{cth} \frac{d}{L} \frac{p_0}{L}.$$

При $j < j_{\text{гр}}$ ($x_0 \leq 0$) вся база занята первой областью и при этом ловушки почти пусты для дырок (нейтральны).

С ростом уровня инжекции ($j > j_{\text{гр}}$) в базу вступает вторая область $x_0 > 0$ — ловушки начинают захватывать дырки. При $x_0 \approx \frac{d}{2}$ почти половина ловушек заполнена дырками ($E_F^p = E_n$). С дальнейшим ростом тока x_0 приближается к d (но не равняется) и базу преимущественно заполняет область, где ловушки забиты дырками.

2. Расчет вольт-амперной характеристики

Из условия (7) следует, что в этом случае всегда $\frac{dp}{dx} < 0$ и $B < 0$, т. е. нет минимума концентраций в базе диода и дискриминант $\Delta_i = b_i^2 - 4AB$ положительный (где $i = 1, 2$; $b_1 = p_n^0 + \frac{b}{b\theta + 1} N_g$;

$b_2 = p_n^0 + \frac{b}{b+1} \delta N_g$. Поэтому в общем виде зависимость тока от напряжения при высоких уровнях инжекции имеет вид

$$V \sim \alpha(j) \ln \beta(j). \quad (10)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

А. Вольт-амперные характеристики, соответствующие первой и второй областям в отдельности.

Предполагая, что в базе имеет место только первая область ($x_0 < 0$, $j < j_{gr}$) и когда

$$j < j_1, \left(p(0) < b_1 \operatorname{sh} \frac{d}{L} \right), \quad (11)$$

для ВАХ получим

$$V = \frac{c_1^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_1^0}} + j R_{\pi}, \quad (12)$$

а при

$$j_1 < j < j_{gr} \quad (13)$$

имеем

$$V = \frac{c_1 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_1}}, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= c_1^0 + c_1'; \quad j_{c_1} = \frac{c_1^0}{j_{c_1^0}} \cdot j \cdot \frac{c_1'}{c_1}; \quad j_{c_1^0} = j_s \cdot \frac{1}{j_{s_2}} \cdot \frac{b\theta - 1}{(b\theta + 1)c_1^0}; \\ c_1^0 &= \frac{2b\theta}{b\theta + 1}; \quad c_1' = \frac{\beta_1 \operatorname{ch} d/L}{b\theta + 1}; \quad \beta_1 = \frac{2\theta p(0) + N_g}{\theta p(0) + N_g}; \\ j_s &= q D_p \beta_1 \operatorname{cth} \frac{d}{L} \frac{p_n^0}{L}; \quad j_{s_1} = j_1 / 2 \operatorname{th} \frac{d}{2L}; \quad j_{s_2} = j_1 / \operatorname{sh} \frac{d}{L}; \\ j_1 &= q D_p \beta_1 \operatorname{ch} \frac{d}{L} \frac{b_1}{L}; \quad R_{\pi} = \rho_1 d; \quad \rho_1 = 1 / q u_p (b\theta + 1) b_1. \end{aligned}$$

Аналогично для второй области при

$$j \leq j_2 \left(p(0) \leq b_2 \operatorname{sh} \frac{d}{L} \right), \quad (15)$$

где $j_2 = q D_p \beta_2 \operatorname{ch} \frac{d}{L} \frac{b_2}{L}$, $\beta_2 = \frac{2p(0) + \delta N_g}{p(0) + \delta N_g}$, получим характеристики типа (12) и (14).

Однако в них нужно положить $\theta = 1$ и N_g заменить на δN_g . Заметим, что выражение (14), также как аналогичная формула для второй области, при $N_0 = 0$ переходит в соответствующую формулу работы [5].

Б. Вольт-амперная характеристика, соответствующая переходной области.

Если $0 < x_0 < d$, то в базе находятся первая и вторая области (рис. 1) и при этом имеет место характеристика переходной области. Причем здесь возможно рассмотрение нескольких случаев в зависимости от параметров диода и ловушек.

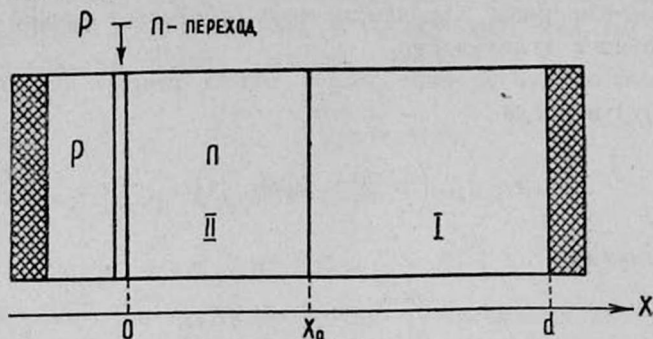


Рис. 1. Модель диода для расчета ВАХ переходной области.

1. Если параметры диода и ловушек таковы, что имеет место условие

$$j_{rp} < j_1, \left(\frac{N_0}{N_g} < \operatorname{sh} \frac{d}{L} \right), \quad (16)$$

то в базе появляется вторая область (x_0), хотя еще не выполняется условие (13), т. е. переходная область начинается до наступления характеристики типа (14) для первой области. Тогда ВАХ, соответствующая переходной области, и выражение дифференциального сопротивления имеют вид (при $j_{rp} < j < j_0$):

$$V = \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \gamma_0 + j R_1(j), \quad (17)$$

$$\frac{dV}{dj} = \frac{kT}{q} \frac{c_2^0}{j} + R_{T1}(1 - \gamma), \quad (18)$$

где

$$c_2^0 = \frac{2b}{b+1}; \quad j_{c_2^0} = j_s \frac{1}{c_2^0} \cdot \frac{b-1}{(b+1)c_2^0}; \quad \gamma_0 = \left(\frac{b_0}{b_1} \right)^{\frac{b\theta-1}{(b\theta+1)c_2^0}} \cdot \left(\frac{b_2}{b_0} \beta_0 \right)^{\frac{b-1}{(b+1)c_2^0}};$$

$$j_{s_2}' = j_2 / \operatorname{sh} \frac{d}{L}; \quad R_1(j) = \rho_1 (d - \beta_0' x_0) = \rho_1 \left[(1 - \beta_0') d + \beta_0' L \operatorname{Arsh} \frac{j_0}{j} \right];$$

$$\gamma = \beta_0 \left(\frac{L}{d} \frac{j_0}{j^2 + j_0^2} + \frac{x_0}{d} \right); \quad \beta_0 = (p(0) + \frac{b\theta N_g}{b+1}) / p(0);$$

$$\beta_0' = 1 - \rho_2 / \rho_1 \approx 1 - 1/\theta; \quad b_0 = p(x_0) + \frac{bN_g}{b\theta+1}; \quad b_0' = p(x_0) + \frac{b\theta}{b+1} N_g;$$

(Здесь и в дальнейшем при определении dV/dj считаем, что $d\tau_0/dj = 0$, так как в переходной области ($p(0) > p_0$) $\beta_0 \approx 1$).

Из (17) при $x_0 \approx 0$ получается ВАХ первой области типа (12), когда $x_0 \rightarrow d$, ($j_0 < j < j_2$) имеем

$$V = V_1 + \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} + j R_{T2}, \quad (19)$$

где

$$V_1 = \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \tau_0' + j_0 R_1^0; \quad \tau_0' = \tau_0 \cdot \beta_0^{\frac{b-1}{(b+1)c_2^0}};$$

$$R_{T2} = \rho_2 d; \quad R_1^0 = \rho_1 \beta_0' L_1; \quad \rho_2 = 1/q \mu_p (b+1) b_2.$$

V_1 — не зависит от тока и может рассматриваться как некоторое напряжение „отсечки“.

Так как $\beta_0' < 1$ и $x_0 < d$, то с ростом тока всегда растет и V .

При переходе от первой области ко второй падающая характеристика не появляется. В этом легко убедиться, анализируя выражение дифференциального сопротивления (18).

При всех значениях тока, больших чем $j_{гр}(x_0 > 0)$, $\gamma < 1$, так что $\frac{dV}{dj} > 0$.

Характеристика переходной области для этого случая графически изображена на рис. 2 (кривая 1).

2. Для диодов с такими параметрами, которые удовлетворяют условию

$$j_{гр} > j_1, \quad \left(\frac{N_0}{N_g} > \operatorname{sh} \frac{d}{L} \right), \quad (20)$$

вольт-амперная характеристика переходной области в интервале токов $j_{гр} < j < j_0$ имеет следующий вид:

$$V = \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \tau_1(j) + j R_2(j). \quad (21)$$

Для дифференциального сопротивления получим выражение

$$\frac{dV}{dj} = \frac{k T}{q} \frac{c_2^0}{j} + A_1 + B_1 \gamma_1, \quad (22)$$

$$\gamma_1 = j_0 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{j_0}{j} \right)^2} - 1 \right) - j_1 \left[\frac{1}{2} \frac{j_0}{j} + \left(\sqrt{\left(\frac{j_0}{j} \right)^2 + 1} + \frac{j_0}{j} \right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{j_0}{j} \right)^2} - 1 \right) \right]. \quad (23)$$

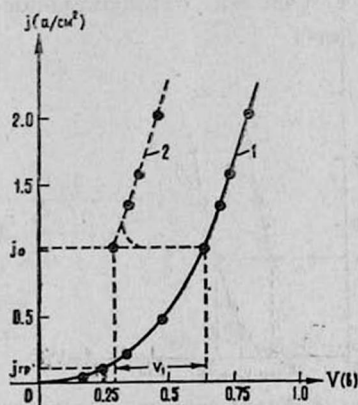


Рис. 2. Зависимость j от V для переходной области в случае

$$\frac{N_0}{N_g} < \operatorname{sh} \frac{d}{L} \left(\frac{N_0}{N_g} = 5, \theta = 5; \right. \\ \left. \frac{d}{L} = 3; N_g = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \right).$$

Выше мы обозначили

$$\gamma_1(j) = \gamma_0 \cdot \gamma_1^0 \cdot \frac{c_1'}{c_2^0}; \quad \gamma_1^0 = \frac{2j - j_1}{j_1} \cdot \frac{\varphi_1 + \psi_1}{\varphi_2 - \psi_1};$$

$$R_2(j) = \rho_2 x_0 = \rho_2 \left(d - L \operatorname{Ar} \operatorname{sh} \frac{j_0}{j} \right); \quad A_1 = R_{T2} \gamma_1^0;$$

$$B_1 = \frac{kT}{q} \cdot \frac{4 \cdot j \cdot c_1'}{2j - j_1} \cdot \frac{(\varphi_1 + \psi_1)^{-1} (\varphi_2 - \psi_1)^{-1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{j_0}{j} \right)^2}};$$

$$\varphi_1 = 2j \operatorname{sh} \frac{d - x_0}{2L} = \sqrt{2j(Vj^2 + j_0^2 - j)};$$

$$\varphi_2 = 2j \operatorname{ch} \frac{d - x_0}{2L} = \sqrt{2j(Vj^2 + j_0^2 + j)};$$

$$\psi_1 = j_1 e^{\frac{d - x_0}{2L}} = j_1 \sqrt{\frac{j_0}{j} + \sqrt{\left(\frac{j_0}{j} \right)^2 + 1}}.$$

Нетрудно убедиться, что при всех значениях тока $j > j_{\text{гр}}$, $\gamma_1 > 0$, и, таким образом, $\frac{dV}{dj} > 0$ (A_1 , B_1 положительные величины), т. е. нет участка отрицательного сопротивления, что хорошо видно из рис. 3 (кривая 1). В частности, когда

$j_0 < j < j_2$ ($x_0 \rightarrow d$), имеем,

$$V = V_2 + \frac{c_2^0 kT}{q} \ln \frac{j}{j_2^0} + j R_{T2}, \quad (21')$$

$$\frac{dV}{dj} = \frac{kT}{q} \frac{c_2^0}{j} + A_1, \quad (22')$$

$$\gamma_1 \rightarrow 0. \quad (23')$$

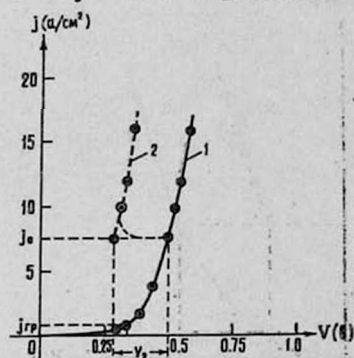


Рис. 3. Характеристика переходной области при $\frac{N_0}{N_g} > \operatorname{sh} \frac{d}{L}$.

$$\left(\frac{N_0}{N_g} = 10^2, \theta = 10, \frac{d}{L} = 3, \right. \\ \left. N_g = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3} \right).$$

Таким образом, и в этом случае при $x_0 \approx 0$ из (21) получается характеристика, соответствующая первой области, а когда $x_0 \rightarrow d$, она переходит в характеристику для второй области. Причем и здесь появляется напряжение „отсечки“

$$V_2 = \frac{c_1' kT}{q} \ln \gamma_1^0 \left(\frac{j_0}{j_1} + 1 \right) - j_0 R_2^0; \quad R_2^0 = \rho_2 L.$$

3. Для диодов с такими параметрами, для которых выполняется условие

$$j'_0 > j_2, \left(\frac{N_0}{N_g} > e^{\frac{d}{L}} \right) \quad (24)$$

при уровнях инжекции

$$j > j_2, \quad (25)$$

ВАХ переходной области и $\frac{dV}{dj}$ имеют вид

$$V = \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \gamma_2(j), \quad (26)$$

$$\frac{dV}{dj} = \frac{kT}{j} \frac{c_2^0}{j} + B_1 \gamma_1 + \frac{c_2' k T}{q} (A_2 + B_2 \gamma_2), \quad (27)$$

$$\gamma_2 = \left(j \operatorname{sh} \frac{d}{L} + j_2 \right) \left(\frac{j_0}{j} + \sqrt{\left(\frac{j_0}{j} \right)^2 + 1} \right) - (j_2 + j_0) e^{\frac{d}{L}}, \quad (28)$$

где

$$\gamma_2(j) = \gamma_1 \cdot \frac{c_2^0}{c_2^0}; \quad \gamma_2^0 = \frac{(\varphi_2 - \psi_2) \left(2j \operatorname{sh} \frac{d}{2L} + j_2 e^{d/2L} \right)}{(\varphi_1 + \psi_2) \left(2j \operatorname{ch} \frac{d}{2L} - j_2 e^{d/2L} \right)}; \quad c_2' = \frac{\beta_2 \operatorname{ch} \frac{d}{L}}{b + 1};$$

$$A_2 = \frac{2j_0 (\varphi_2 - \psi_2)^{-1} (\varphi_1 + \psi_2)^{-1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{j_0}{j} \right)^2}};$$

$$B_2 = \frac{4j j_2 (\varphi_2 - \psi_2)^{-1} (\varphi_1 + \psi_2)}{\left(2j \operatorname{sh} \frac{d}{2L} + j_2 e^{d/2L} \right) \left(2j \operatorname{ch} \frac{d}{2L} - j_2 e^{d/2L} \right)};$$

$$\psi_2 = j_2 e^{\frac{d-x_0}{2L}} = j_2 \sqrt{\frac{j_0}{j} + \sqrt{\left(\frac{j_0}{j} \right)^2 + 1}}; \quad j'_0 \simeq q u_p b \delta N_g \frac{V_2}{d}.$$

Как мы уже выяснили, второй член в выражении (27) (с γ_1) всегда положителен (при $j > 2j_{rp}$) и стремится к нулю, когда $x_0 \rightarrow d$. Относительно третьего члена можно сказать следующее. В нем A_2 и B_2 положительные величины. При $j > j_2$ ($p(0) > b_2 \operatorname{sh} \frac{d}{L}$) j становится больше, чем j_0 (т. к. $j_2 > j_0$ или $b_2 > p_0$), и поэтому при $j > 2j_2$ γ_2 также положительно, так что $\frac{dV}{dj} > 0$.

Из (26) при $x_2 \simeq 0$ получается характеристика для первой области, а когда $x_0 \rightarrow d$ ($j > j_0$) имеем

$$V = V_3 + \frac{c_2 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2}},$$

где

$$c_2 = c_2^0 + c_2'; \quad j_{c_2} = j_{c_2^0} \cdot j_{c_2'}; \quad j_{s_1} = j_{s_1^0} \operatorname{th} \frac{d}{2L};$$

$$V_3 = \frac{c_1' k T}{q} \ln \eta_0' \frac{c_2^0}{c_1'} \left(\frac{j_0}{j} + 1 \right).$$

Характеристика переходной области (26) графически дана на рис. 4 (кривая 1).

В. Полный ход вольт-амперной характеристики.

Если параметры диода удовлетворяют следующим условиям

$$p_1 < p_0 < p_2, \quad (29)$$

где $p_1 = \frac{b}{b\theta + 1} N_g$, $p_2 = \frac{b}{b + 1} \delta N_g$, то можно получить полный ход вольт-амперной характеристики, произведя расчет разделением базы диода на четыре области (рис. 5). Причем границы раздела между областями x_1 и x_2 определяются из условия

$$p(x_i) = p_i$$

и имеют вид

$$x_i = d - L \operatorname{Arsh} \frac{j_i}{j},$$

где

$$i=1, 2; \quad j_i = j_i^0 \operatorname{sh} \frac{d}{L}; \quad j_i^0 = q D_p \beta_i \operatorname{cth} \frac{d}{L} \cdot \frac{p_i}{L}.$$

(Выражение для x_0 дано выше (9)).

Р — п-переход

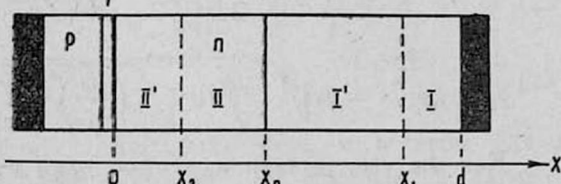


Рис. 5. Модель диода для расчета полного хода ВАХ.

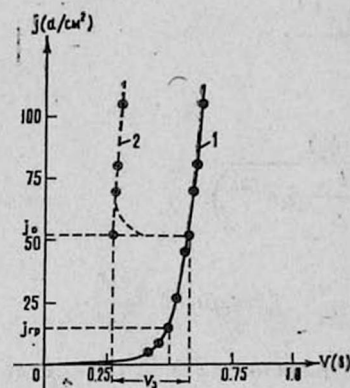


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика переходной области, когда

$$\frac{N_0}{N_g} > e^{\frac{\theta d}{L}} \left(N_g \approx 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}, \right. \\ \left. \frac{N_0}{N_g} \approx 10^3, \theta = 3, \frac{d}{L} = 2 \right).$$

В этом случае вольт-амперная характеристика имеет следующий вид:

$$V = \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \eta_0 + p_1 j L \ln \eta_3 + \frac{c_1' k T}{q} \ln \eta_{1'} + p_2 j L \ln \eta_4 + \frac{c_2' k T}{q} \ln \eta_{2'} \quad (30)$$

или

$$V = \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \tau_1'(j) + j \rho_1 L \ln \tau_1''(j), \quad (30')$$

здесь

$$\begin{aligned} \tau_1'(j) &= \tau_{10} \cdot \tau_{11}' \cdot c_1' / c_2^0 \cdot \tau_{12}' \cdot c_2' / c_2^0; & \tau_1''(j) &= \tau_{13} \cdot \tau_{14}^{c_2' / c_1}; \\ \tau_{11}' &= \frac{\operatorname{th} \frac{d-x_0}{2L}}{\operatorname{th} \frac{d-x_1}{2L}} = \left[\frac{(Vj^2 + j_0^2 - j)(Vj^2 + j_1^2 + j)}{(Vj^2 + j_0^2 + j)(Vj^2 + j_1^2 - j)} \right]^{1/2}; \\ \tau_{12}' &= \frac{\operatorname{th} \frac{d}{2L}}{\operatorname{th} \frac{d-x_2}{2L}} = \left(\frac{Vj^2 + j_2^2 + j}{Vj^2 + j_2^2 - j} \right)^{1/2} \operatorname{th} \frac{d}{2L}; \\ \tau_{13} &= e^{\frac{d-x_1}{L}} = \frac{j_1}{j} + \sqrt{\left(\frac{j_1}{j} \right)^2 + 1}; \\ \tau_{14} &= e^{\frac{x_0-x_2}{L}} = (j_2 + \sqrt{j^2 + j_2^2}) / (j_0 + \sqrt{j^2 + j_0^2}). \end{aligned}$$

Первый член выражения (30) — есть демберевская часть падения напряжения и падение на p - n -переходе. Второй и третий члены представляют собой падения напряжения в толще диода при низких ($p(0) < p_1$) и высоких ($p_1 < p(0) < p_0$) уровнях инжекции для первой области, тогда как четвертый и пятый члены описывают напряжения при $p_0 < p(0) \leq p_2$ для второй области. При $j < j_{rp}$ ($x_0 \leq 0$) из (30) получим в общем виде ВАХ для первой области

$$V = \frac{c_1^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_1^0}} \tau_1^{c_1' / c_1^0} + j \rho_1 L \ln \tau_{13}, \quad (31)$$

откуда при $j \leq j_1^0$ имеем выражение (12); если $j_1 < j < j_{rp}$ ($0 < x_1 \rightarrow d$), то

$$V = V_4^0 + \frac{c_1 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_1}}, \quad (31')$$

где

$$V_4^0 = j_1 R_1^0 / \beta_0'; \quad \tau_{11}' = \frac{\operatorname{th} d/2L}{\operatorname{th} \frac{d-x_1}{2L}} = \left(\frac{Vj^2 + j_1^2 + j}{Vj^2 + j_1^2 - j} \right)^{1/2} \operatorname{th} d/2L.$$

При токах $j_{rp} < j < j_0$ ($0 < x_0 < d$) из (30) следует ВАХ, соответствующая переходной области.

$$V = V_4^0 + \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \tau_1'''(j) + j \rho_2 L \ln \tau_{14}, \quad (32)$$

где

$$\eta''' = \eta_0 \left(2 \frac{j}{j_1} \eta_1''' \right)^{\frac{c_1'}{c_2^0}} \cdot \eta_2'; \quad \eta_1''' = \operatorname{th} \frac{d-x_0}{2L} = \left(\frac{Vj^2 + j_0^2 - j}{Vj^2 + j_0^2 + j} \right)^{1/2}.$$

Из (32) при $j < j_{\text{гр}}$ ($x_0 \lesssim 0$) получается ВАХ, соответствующая первой области (31'), а когда $x_0 \rightarrow d$, имеем

$$V = V_4 + \frac{c_2^0 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2^0}} \cdot \eta_2' + \rho_2 j L \ln \eta_4'. \quad (32')$$

Выражение (32') есть вольт-амперная характеристика для второй области в общем виде, откуда при $j > j_2$ следует

$$V = V_4' + \frac{c_2 k T}{q} \ln \frac{j}{j_{c_2}}. \quad (32'')$$

Выше мы обозначали

$$\eta_4' = e^{\frac{d-x_2}{L}} = \frac{j_2}{j} + \sqrt{\left(\frac{j_2}{j}\right)^2 + 1}; \quad V_4 = V_2 + V_4^0; \quad V_4' = V_4 + j_2 R_2^0.$$

Дифференциальное сопротивление в общем виде для полной характеристики (30) имеет следующий вид

$$\frac{dV}{dj} = \rho_1 L (\ln \eta_3 + A_3) + R_2^0 (\ln \eta_4 - A_4) + B_3 \left(1 - \frac{j_1}{j_0} \right) + B_4, \quad (33)$$

где

$$A_3 = \operatorname{th} \frac{d-x_1}{L} = \frac{j_1}{Vj^2 + j_1^2};$$

$$A_4 = \frac{\operatorname{sh} \frac{x_0-x_2}{L}}{\operatorname{ch} \frac{d-x_0}{L} \operatorname{ch} \frac{d-x_2}{L}} = \frac{j_2 \sqrt{j^2 + j_0^2} - j_0 \sqrt{j^2 + j_2^2}}{j \sqrt{(j^2 + j_0^2)(j^2 + j_2^2)}};$$

$$B_3 = \frac{c_1' k T}{q} \frac{j_0 (j_0 + j_1)}{\sqrt{(j^2 + j_1^2)(j^2 + j_0^2)} (Vj^2 + j_0^2 + Vj^2 + j_1^2)};$$

$$B_4 = \frac{k T}{q} \left(\frac{c_2^0}{j} + \frac{c_2'}{Vj^2 + j_2^2} \right).$$

Анализируя (33), можно убедиться, что всегда $\frac{dV}{dj} > 0$, т. е. и в этом общем случае нет отрицательной характеристики. В этом можно убедиться непосредственно численным расчетом.

Численный расчет произведен для диода с такими параметрами:

$$\frac{d}{L} = 3; \quad \frac{N_0}{N_g} \approx 10^2; \quad N_g = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

Результаты численного расчета графически изображены на рис. 6 (кривая 1).

В заключение отметим следующее:

1. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -диода (т. к. $\frac{d}{L} > 1$ и если $V_1 \gg V_{pn}, V_g$) до начала переходной области ($j \lesssim j_{rp}$) является либо только омической (12) (когда $j_{rp} < j_1$ или $\frac{N_0}{N_g} < \text{sh} \frac{d}{L}$), либо вначале омической, а затем экспоненциальной (при $j_{rp} > j_1$ или $\frac{N_0}{N_g} > \text{sh} \frac{d}{L}$) в зависимости от параметров диода и ловушек.

2. При $j > j_{rp}$ ($0 < x_0 < d$) имеет место характеристика переходной области. Она имеет различный вид ((17), (21), (26), (32)) в зависимости от значений параметров диода и ловушек $\frac{d}{L}, \theta, \delta$.

Анализ этих характеристик показал, что дифференциальное сопротивление $\frac{dV}{dj}$ при $j > 2j_{rp}$ всегда остается положительным, т. е. нет падающего участка. Причем, когда $x_0 \rightarrow d$, вышеуказанные характеристики переходной области переходят в соответствующие характеристики второй области с добавлением некоторого напряжения „отсечки“ (рис. 2, 3, 4, 6 (кривая 1)). Если ограничиться решением задачи для первой и второй области в отдельности (как в [1]) и тем самым не учитывать появления напряжения „отсечки“, то ВАХ для второй области имеет вид, показанный на рис. 2, 3, 4, 6 (кривая 2), т. е. как бы имеет место падающий участок. Однако, как мы уже отметили, при переходе от первой области ко второй появляется напряжение „отсечки“, которое исключает возможность падающего участка (кривая 1).

Следует отметить, что при появлении напряжения „отсечки“ наблюдается эффект „накопления“ поля (если можно так выразиться) в узкой области ($\Delta x_0 = d - x_0 = L \frac{j_0}{j}$) у тылового контакта:

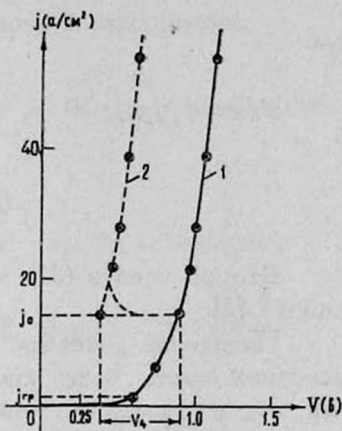


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика переходной области, когда $p_1 < p_0 < p_2$.

$$\bar{E} \approx \frac{V_{отс}}{\Delta x_0} = \frac{V_{отс}}{L} \frac{j}{j_0}. \quad (34)$$

Это объясняется тем, что при переходе от первой области ко второй у тылового контакта всегда остается очень узкая область Δx_0 (т. к. тыловой контакт омический), в которой уровни прилипания еще не заполнены дырками.

Появление напряжения „отсечки“ и „накопления“ поля у тылового контакта наблюдается даже в том случае, когда в базе отсутствуют прилипания для дырок. Можно убедиться, что для модели диода, рассматриваемой в работе [5], при переходе от характеристики низкого уровня инжекции к характеристике высокого уровня инжекции появляется напряжение „отсечки“, т. е.

$$V = V_{отс} + \frac{ckT}{q} \ln \frac{j}{j_c}, \quad (35)$$

где

$$V_{отс} = \rho_k j_k L, \quad \rho_k = 1/q\mu_p b N_g, \quad j_k = \frac{2qD_p}{L} \frac{b}{b+1} N_g \operatorname{ch} \frac{d}{L},$$

$$L = \sqrt{\frac{2b}{b+1} D_p \tau_p}.$$

Второй член в (35) есть ВАХ при высоких уровнях инжекции в работе [5].

Появление „отсечки“ в этом случае связано с тем, что, хотя в основной части базы диода имеет место высокий уровень инжекции, все же у тылового контакта остается достаточно узкая область $\Delta x_k \approx d - x_k \approx L \frac{j_k}{j}$, в которой $p < N_g$.

Анализ распределения поля по базе диода показал, что при одинаковых напряжениях на диоде, в узкой области у тылового контакта, накапливается более сильное поле в случае наличия уровней прилипания, чем в случае их отсутствия (при одинаковых параметрах диода

$\frac{d}{L}$, N_g , L). Другими словами, уровни прилипания для дырок способствуют более сильному концентрированию поля у контакта. Это объясняется тем, что при прохождении тока через диод центры прилипания захватывают дырки, что приводит к появлению электронов в зоне проводимости (для сохранения условия квазинейтральности) и повышению проводимости базы. Поэтому при одинаковых напряжениях диодам с уровнями прилипания для дырок соответствуют более сильные токи и достаточно узкие Δx_1 ($\Delta x_1 \approx L \frac{j_1}{j}$), чем для диодов без

центров прилипания, что и приводит к более сильному накоплению поля у тылового контакта.

В пределе больших токов в этой узкой области накапливаются достаточно большие поля, что в принципе может привести к зависимости $u_n, u_p \sim f(E)$ и умножению. Однако при токах, которые имеют место в нашем случае, $E < 10^3$ в/см.

3. Автор [1] получил неправильный результат о существовании отрицательного сопротивления из-за того, что не рассматривал переходной области и не анализировал дифференциальное сопротивление $\frac{dV}{dj}$ для этой области.

Отметим так же, что в принципе с увеличением тока уровень прилипания может стать рекомбинационным, когда демаркационный уровень для дырок пересечет рассматриваемый уровень. Однако мы не учитывали этой возможности, поскольку ставили перед собой задачу рассмотреть влияние на ВАХ именно уровней прилипания.

Институт радиофизики и электроники
АН Армянской ССР

Поступила 10 июня 1966.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. Ю. Лейдсман, Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, № 2, 29 (1965).
2. М. Lampert, Phys. Rev., 103, 1648 (1956).
3. М. Ламперт, ТИРИ, 50, 8 (1962).
4. Г. М. Авакьянц, А. У. Рахимов, Изв. АН АрмССР, Физика, 1, 164 (1966).
5. В. И. Стафеев, ЖТФ, 28, 1631 (1958).

ԿՊԶՈՂԱԿԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ p - n -ՈՒՂԴԻՉՆԵՐԻ
ՎՈՒՏ-ԱՄՊԵՐԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻ ՎՐԱ

Գ. Մ. ՍՎԱԳՅԱՆՑ և Ա. ՌԱԶԻՄՈՎ

Հետազոտված է կալոլական մակարդակների ազդեցությունը թիկունքային օժական կոն-տակտով ուղղիչ կիսահաղորդիչների վոլտ-ամպերային բնութագրի վրա:

Ստացված են բանաձևեր տարբեր տեղամասերի և վոլտ-ամպերային բնութագրի լրիվ ընթացքի համար:

Հետազոտված են անցողական պրոցեսների բնութագրերը, համապատասխանորեն դիոդի պարամետրերի և թակարդի տարբեր արժեքների համար: Բերված են այդ բնութագրերը պատկերող գրաֆիկները: Ի տարբերություն [1]-ից նշված է բացասական դիմադրության տեղամասի բացակայությունը վոլտ-ամպերային բնութագրի վրա:

Ցույց են տրված արդյունքների տարբերության պատճառները:

ON THE INFLUENCE OF STICK CENTERS UPON THE
VOLT-AMPERE CHARACTERISTIC OF $p-n$ -DIODES

G. M. AVAKIANTS and A. U. RAHIMOV

The influence of the stick levels upon the volt-ampere characteristic of semiconductor diode with the ohm rear contact is investigated. The expressions both for the different parts and the whole volt-ampere characteristic are obtained. The characteristics and differential resistances of the transition region corresponding to different values of diode and trap parameters are analyzed. The diagrams of these characteristics are given. In contrast to [1], the absence of the negative resistance region on the volt-ampere characteristic is noted. The reason of the difference between the results are pointed out.