

ДВОЙНАЯ ИНЖЕКЦИЯ В ПОЛУПРОВОДНИК, КОМПЕНСИРОВАННЫЙ ГЛУБОКИМИ АКЦЕПТОРАМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ В НИЖНЕЙ ПОЛОВИНЕ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

В. М. АРУТЮНЯН

Произведен расчет статической вольт-амперной характеристики «длинного» диода в условиях уменьшающихся с ростом уровня инжекции времени жизни и эффективного коэффициента диффузии дырок при учете диффузионного члена в уравнении для распределения дырок в базе.

В работе [1] рассмотрено прохождение тока в режиме двойной инжекции через структуры из высокоомного материала, изготовленного путем компенсации полупроводника n -типа примесью, создающей глубокие акцепторные центры в нижней половине запрещенной зоны. Показано, что после закона Ома имеется область токов, где время жизни дырок и эффективный коэффициент диффузии D^p уменьшаются с увеличением уровня инжекции согласно формулам (см. (35) и (24) в [1])

$$D^p \simeq D_p \frac{\partial_0 N_g}{b n_0}, \quad (1)$$

$$\tau_p \simeq \tau_p^0 \frac{p_1}{b n} \quad (2)$$

(в формулах (1) и (2) и всюду ниже, где это не оговорено, используются обозначения работы [1]).

Распределение дырок в базе структуры описывается уравнением [1]

$$D^p \frac{d^2 p}{dx^2} + \mu^- E \frac{dp}{dx} + D_n \frac{p}{b n_0} \frac{\partial^2 n}{\partial p^2} \left(\frac{dp}{dx} \right)^2 = \frac{p - p_T}{\tau_p}. \quad (3)$$

В настоящей работе, как и в [1], рассматривается «длинная» структура, т. е. длина базы d считается заметно превышающей диффузионную длину $L_{p0} = \sqrt{D_p \tau_p^0}$. В силу того, что при сравнительно невысоких уровнях инжекции n_0 , как это следует из (1) и (2), $D^p \frac{d^2 p}{dx^2}$ может быть больше члена с $\frac{dp}{dx}$, при $\sqrt{D^p \tau_p} > d > \sqrt{D_p \tau_p^0}$ в (3) можно ограничиться приближением

$$D^p \frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_T}{\tau_p}. \quad (4)$$

С использованием (1), (2) и результатов работы [1] (4) можно привести к уравнению для безразмерных переменных Δp и y

$$\frac{d^2 \Delta p}{dy^2} = (\Delta p)^3, \quad (5)$$

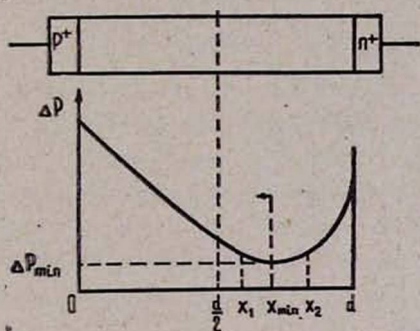
где

$$\Delta p = \frac{p - p_T}{V \frac{p_1 N_g}{p_1 N_g}}, \quad y = \frac{x}{L_0}, \quad (6)$$

$$L_0^2 = \frac{\delta_0^2 \theta}{1 + \frac{\delta_0 \theta}{b}} D_p \tau_p^0, \quad \delta = \frac{\delta_0 + \frac{p_1}{\theta N_g}}{1 + \frac{\delta_0 \theta}{b} + \frac{p_1}{N_g}}.$$

Заметим, что решение уравнения (5) имеет самостоятельный интерес как решение задачи о тримолекулярной рекомбинации для случая, когда Δp пропорционально Δp . Разумеется, в последнем случае в (6) будут фигурировать совершенно иные нормировочные множители.

Одной из особенностей двойной инжекции является наличие минимума концентрации n и p по базе, причем для случаев, аналогичных рассматриваемому здесь, $p_{\min} > p_T$ и $n_{\min} > n_T$, что свидетельствует о достаточно высоком уровне инжекции. Это условие было принято в работах по мономолекулярной рекомбинации [2—4] и бимолекулярной рекомбинации [4—6]. Наличие такого минимума предполагается и в настоящей работе (см. рисунок).



Схематическое изображение структуры и распределения концентрации дырок в базе. Стрелкой указано направление смещения минимума концентрации с ростом тока. Значения $p_{\min}$, x_1 , x_2 и $x_{\min}$ приводятся в тексте.

Первый интеграл (5) есть

$$\frac{d\Delta p}{dy} = \pm \sqrt{\frac{\Delta p^4}{4} + 2C_1}, \quad (7)$$

где C_1 — постоянная интегрирования, которую можно найти из условия наличия минимума в распределении концентрации дырок в базе. Приводя подкоренную функцию к нормальной форме Лежандра, получим [7, 8]

$$\pm F(\varphi, k) = \Delta p_{\min} (y - y_{\min}), \quad (8)$$

причем аргумент и модуль неполного эллиптического интеграла I рода $F(\varphi, k)$ соответственно равны

$$\varphi = \arccos \frac{\Delta p_{\min}}{\Delta p}, \quad k = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

В (8) знак минус берется слева от $x_{\min}$, плюс — справа.

Используя обращение эллиптического интеграла [7], получим формулу для распределения концентрации дырок в базе в виде

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_{\min}} = \text{nc} \left[\Delta p_{\min} (\pm y_{\min} \mp y), \frac{1}{\sqrt{2}} \right]. \quad (10)$$

Здесь верхний знак берется для левой части базы, нижний — для правой, пси — эллиптическая функция Якоби [7].

Для падения напряжения на толще структуры имеем

$$V_T = \frac{\sqrt{2} \delta_0 \theta L_0 j}{\text{en} \left(1 + \frac{\delta_0 \theta}{b} \right) \Delta p_{\min}^2 \sqrt{p_1 N_g}} \{ \arccos [dn \Delta p_{\min} (y_d - y_{\min})] + \\ + \arccos (dn \Delta p_{\min} y_{\min}) \}. \quad (11)$$

Демберовское падение напряжения равно

$$V_D = \frac{k_0 T}{e} \frac{1 - \frac{\delta_0 \theta}{b}}{1 + \frac{\delta_0 \theta}{b}} \ln \frac{\text{cn}(y_{\min} \Delta p_{\min})}{\text{cn}[(y_d - y_{\min}) \Delta p_{\min}]}, \quad (12)$$

спи и dnu — эллиптические функции Якоби.

Такая форма записи V_T и V_D затрудняет сравнение с опытом. Ниже мы попытаемся сделать упрощения. В участках базы, примыкающих к переходу, где $\Delta p(y)$ заметно больше $\Delta p_{\min}$, можно воспользоваться разложением эллиптического интеграла в ряд по биномиальной формуле [7, 8]. Так как величина модуля сравнительно большая, ограничимся следующими членами разложения:

$$F(\varphi, k) = \varphi \left(1 + \frac{k^2}{4} \right) - \frac{\sin 2\varphi}{4} k^2 \left(1 + \frac{3}{8} k^2 \right) + \dots = \\ = \frac{9\pi}{16} - \frac{91}{64} \frac{\Delta p_{\min}}{\Delta p} = 1,75 - 1,42 \frac{\Delta p_{\min}}{\Delta p}. \quad (13)$$

Используя это разложение, можно получить

$$x_{\min} = \frac{1}{2} \left\{ d + 1,42 \sqrt{p_1 N_g} L_0 \frac{p(0) - p(d)}{[p(0) - p_T][p(d) - p_T]} \right\}, \quad (14)$$

$$p_{\min} - p_T = \frac{3,5 \sqrt{p_1 N_g}}{\frac{d}{L_0} + 1,42 \sqrt{p_1 N_g} \frac{p(0) + p(d) - 2p_T}{[p(0) - p_T][p(d) - p_T]}}, \quad (15)$$

$$\pm p(x) \mp p_T = 2,82 \sqrt{p_1 N_g} R^{-1}, \quad (16)$$

$$R = (\pm 1 + 1) \frac{d}{L_0} - 2 \frac{x}{L_0} + \frac{1,42 \sqrt{p_1 N_g} \{ [p(0) - p_T] (\pm 1 + 1) + [p(d) - p_T] (\pm 1 - 1) \}}{[p(0) - p_T] [p(d) - p_T]}.$$

Из условия идеальности переходов и токовых уравнений следует

$$p(0) - p_T = \sqrt{p_1 N_g \frac{j}{j_0}}, \quad (17)$$

$$j_0 = \frac{128}{91} \frac{e D_p \sqrt{p_1 N_g}}{L_0}, \quad (18)$$

причем из условия, что $x_{\min} < d$, получаем ограничение снизу на плотность тока

$$j > j_0 \frac{2b}{\delta \theta} \frac{L_0^2}{d^2} \left(1 - \sqrt{\frac{\delta \theta}{b}} \right)^2. \quad (19)$$

Тогда из (14) имеем

$$x_{\min} = \frac{d}{2} + 0,71 L_0 \left(\sqrt{\frac{b}{\delta \theta}} - 1 \right) \sqrt{\frac{j_0}{j}}, \quad (20)$$

т. е. распределение носителей асимметрично относительно середины базы, но с ростом тока степень асимметрии уменьшается.

Вблизи минимума концентрации $p_{\min}$ можно воспользоваться разложением функции спн в ряд [7, 8]

$$\text{спн} = 1 - \frac{u^2}{2} + \dots \quad (21)$$

и тогда

$$p(x) - p_T = \frac{p_{\min} - p_T}{1 - (p_{\min} - p_T)^2 (x_{\min} - x)^2 / 2 p_1 N_g L_0^2}. \quad (22)$$

Если считать, что имеется перекрытие областей, где справедливы разложения (13) и (22), можно найти те значения x_1 и x_2 , где зависимости типа (16) сменяются на (22):

$$x_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{8a}{9\pi} \right) d + 1,42 L_0 \sqrt{\frac{j_0}{j}} \left\{ \sqrt{\frac{b}{\delta \theta}} \left(\frac{1}{2} - \frac{8a}{9\pi} \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{8a}{9\pi} \right) \right\}, \quad (23)$$

$$x_2 = \left(\frac{1}{2} + \frac{8a}{9\pi} \right) d + 1,42 L_0 \sqrt{\frac{j_0}{j}} \left\{ \sqrt{\frac{b}{\delta \theta}} \left(\frac{1}{2} + \frac{8a}{9\pi} \right) - \frac{1}{2} + \frac{8a}{9\pi} \right\}.$$

Приравнявая (13) и (21), получаем два значения a , равных 0,5 и 0,9. Выбор $a=0,5$ дает меньшую ошибку при разложении функций и при $p_{1,2} - p_T = 1,14 (p_{\min} - p_T)$ имеет место смена решений (16) и (22).

Тогда падение напряжения на толще базы равно

$$V_T = \frac{1,2}{1 + \frac{b}{\partial\theta}} \sqrt{\frac{D_p j}{e \mu_p^2 L_0 V_{p_1 N_g}}} \left\{ d \sqrt{\frac{b}{\partial\theta}} - \left(\sqrt{\frac{b}{\partial\theta}} x_2 - x_1 \right) (0,617 - \right. \\ \left. - 0,383 \sqrt{\frac{b}{\partial\theta}}) + \frac{0,35}{L_0} \sqrt{\frac{j_0}{j}} [x_1^2 + (d - x_2)^2] + \right. \\ \left. + 0,276 \sqrt{\frac{j_0}{j}} \frac{d (x_2 - x_1)}{L_0} \right\}. \quad (24)$$

Складывая V_T с демберовским падением напряжения

$$V_D \approx \frac{k_0 T}{2e} \frac{1 - \frac{\partial\theta}{b}}{1 + \frac{b}{\partial\theta}} \ln \frac{b}{\partial\theta} \quad (25)$$

и контактной разностью потенциалов

$$V_K = \frac{k_0 T}{e} \ln \left[\frac{j p_1 N_g}{j_0 \sqrt{b \frac{\partial\theta}{\partial\theta} n_i^2}} \right] = \frac{k_0 T}{e} \ln \left[\frac{j N_g}{j_0 \sqrt{b \frac{\partial\theta}{\partial\theta} n_1}} \right], \quad (26)$$

получим выражение для вольт-амперной характеристики структуры. Если величина (26) больше величин, определяемых согласно (24) и (25), то вольт-амперная характеристика прибора близка к экспоненциальной.

С дальнейшим ростом тока член $D'' \frac{d^2 p}{dx^2}$ становится меньше члена $\mu E \frac{dp}{dx}$. Тогда имеет место зависимость $j \sim V^{3/2}$ и др., которые обсуждались в [1].

Институт радиофизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 23.V.1973

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. М. Авакьянц, В. М. Арутюнян. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 197 (1974).
2. М. А. Lampert. Repts. Progr. Phys., 27, 329 (1964).
3. А. Rose. J. Appl. Phys., 35, 2664 (1964).
4. Ю. С. Акимов, И. В. Рыжиков. ЭТ, серия 2, № 4, 3; № 6, 47 (1972).
5. Э. И. Рашба, А. И. Носарь. ЖТФ, 27, 1431 (1957).
6. L. M. Rosenberg, M. A. Lampert. J. Appl. Phys., 41, 508 (1970).
7. Г. Бейтмен, А. Эрдейи. Высшие трансцендентные функции, Наука, М., 1967, том 3, гл. 13.
8. Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. Специальные функции, Наука, М., 1964.

ԿՐԿՆԱԿԻ ԻՆՓԵԿՑԻԱ ԱՐԳԵԼՎԱԾ ԶՈՆԱՅԻ ՆԵՐՔԵՎԻ ՄԱՍՈՒՄ
ԳՏՆՎՈՂ ԽՈՐԸ ՄԱԿԱՐԴԱԿՆԵՐՈՎ ՀԱՄԱԿՇՈՎԱԾ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉՈՒՄ

Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Բերված է «երկար» դիոդի ստատիկ վոլտ-ամպերային բնութագրի հաշվարկը ինքնակցիայի մակարդակի մեծացման հետևանքով խոռոչների կյանքի տևողության և դիֆուզիայի գործակցի փոքրացման պայմաններում: Խոռոչների բաշխման հավասարման մեջ հաշվի է առնված դիֆուզիոն անդամը:

DOUBLE INJECTION INTO SEMICONDUCTOR COMPENSATED BY DEEP ACCEPTORS LYING IN THE LOWER HALF OF FORBIDDEN BAND

V. M. HARUTYUNYAN

Static CV-characteristic for long diode is calculated in the case, when the hole lifetime as well as effective diffusion constant decrease with the increase of injection level. Diffusion term is taken into account in the equation for the hole distribution in base.