

**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ МЕТАЛЛ—ПОЛУПРОВОДНИК  
(ДИЭЛЕКТРИК) — МЕТАЛЛ**

Ю. Н. СУХУШИН, С. А. ЗАЙДМАН

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры радиотехники)

Переходные процессы в непроводящих материалах в электрическом поле имеют большое значение при изучении большого круга электрофизических явлений, таких как электропроводность, электролюминесценция, электретное состояние, электрический пробой, возбуждение различных неэлектрических процессов в электрическом поле и многих других. Решение этой задачи осложняется большим многообразием явлений, происходящих в электрическом поле в веществе, что особенно ярко выражено в электрофизике высокоомных материалов. Известные подходы, основанные, как правило, на совместном решении дифференциальных уравнений Пуассона, непрерывности и кинетических уравнений, например [1, 2, 3], приводят к громоздким выражениям или совсем не решаются в общем виде, что затрудняет понимание физики явлений. В работе предлагается метод рассмотрения переходных процессов на основе феноменологического подхода, в котором на основе известных физических закономерностей поведения обычных зарядов в твердом теле переходный процесс выражается как распределение поля и сопротивление между электродами, а также тока через вещество. Решение предполагается проводить методом последовательных приближений, вовлекая в рассмотрение все более и более широкий круг явлений.

В настоящем, первом, приближении за основу берутся следующие предпосылки:

1. Распределение потенциала обусловлено исключительно контактными явлениями.

2. Инжекция и экстракция неравновесных носителей, а также их рекомбинация отсутствуют.

3. Распределение потенциала до момента приложения напряжения в области объемного заряда принимается линейным.

$$\tilde{\Delta\varphi}(x) = \Delta\varphi_k \left(1 - \frac{x}{l_d}\right). \quad (1)$$

4. Движение области объемного заряда определяется только дрейфом носителей.

5. Рассматривается активный ток.

Рассмотрим для определенности случай электронного полупроводника, работа выхода которого больше работы выхода металла на кон-

такте. Концентрация электронов в области объемного заряда выражается известным соотношением

$$n = n_0 \exp [-\tilde{\Delta}\varphi(x)],$$

или с учетом (1)

$$n = n_0 \exp \left[ -\tilde{\Delta}\varphi_{\kappa} \left( 1 - \frac{x}{l_x} \right) \right]. \quad (2)$$

Сопротивление такого контактного слоя будет

$$R_{\kappa} = \int_0^{l_0} \frac{dx}{q\mu n(x) \cdot S} = \frac{l_0}{q\mu n_0 \tilde{\Delta}\varphi \cdot S} (e^{\tilde{\Delta}\varphi} - 1), \quad (3)$$

а сопротивление области, свободной от обычных зарядов,

$$R_0 = \frac{l - 2l_0}{q\mu n_0 \cdot S}. \quad (4)$$

Сопротивление же всего образца будет

$$R = R_0 + 2R_{\kappa}$$

или

$$R = \frac{2l_0(e^{\tilde{\Delta}\varphi} - 1) + \tilde{\Delta}\varphi(l - l_0)}{q\mu n_0 \cdot S \cdot \tilde{\Delta}\varphi}. \quad (5)$$

Условие отсутствия инжекции, экстракции и рекомбинации носителей равносильно условию постоянства сопротивления образца, так что вольт-амперная характеристика для нашего приближения будет иметь вид

$$I_{\pi}(t) = \frac{2l_0(e^{\tilde{\Delta}\varphi} - 1) + \tilde{\Delta}\varphi(l - l_0) \cdot V_{\text{вн}}(t)}{q\mu n_0 \cdot S \cdot \tilde{\Delta}\varphi}. \quad (6-1)$$

Таким образом, условие (2) равносильно условию сохранения закона Ома в переходном процессе.

Внешнее поле распределяется пропорционально сопротивлениям отдельных областей, то есть

$$V_i = \frac{R_i}{R} V_{\text{вн}},$$

или для рассматриваемых областей

$$V_{\kappa}(t) = \frac{l_0 \cdot V_{\text{вн}}(t)}{2l_0 + (l - 2l_0) \frac{\tilde{\Delta}\varphi}{e^{\tilde{\Delta}\varphi} - 1}} \pm \Delta\varphi_{\kappa}, \quad (7)$$

$$V_0(t) = \frac{(l - 2l_0) V_{\text{вн}}(t)}{2l_1(e^{\tilde{\Delta}\varphi} - 1) + \tilde{\Delta}\varphi(l - 2l_0)}.$$

Знак «+» для падения напряжения у катода, а «-» у анода. Видно, что распределение потенциала описывается законом изменения внешнего напряжения.

Чтобы выразить распределение напряженности поля внутри образца по рассматриваемым областям, используем условие (4), будем счи-

тать, что область объемного заряда перемещается по образцу по закону [4].

$$l_k(t) = l_0 \pm \mu E_k(t) \cdot t, \quad (8)$$

или

$$l_k(t) = l_0 \pm \mu \frac{V_k(t)}{l_k(t)} \cdot t,$$

откуда

$$l_k(t) = \frac{l_0}{2} + \sqrt{\frac{l_0^2}{4} \pm \mu V_k(t) \cdot t}. \quad (9)$$

Причем знак «+» относится к прикатодной области, а знак «—» к прианодной.

Совместное решение (7) и (9) и условие  $E_i = \frac{V_i}{l_i} \pm E_{к0}$  дает иско-  
мое распределение погрешностей

$$E_{кп} = \frac{V_{вн}(t)}{\left[ 2l_0 + (l - 2l_0) \frac{\tilde{\Delta\varphi}}{e^{\tilde{\Delta\varphi}} - 1} \right] \Delta_k(t)} \pm \frac{\tilde{\Delta\varphi}_k}{l_0 \Delta_k(t)}, \quad (10-1)$$

где

$$\Delta_k(t) = 1 + \sqrt{1 \pm \left[ \frac{V_{вн}(t)}{2l_0 + (l - 2l_0) \frac{\tilde{\Delta f}}{e^{\tilde{\Delta\varphi}} - 1}} \pm \Delta\varphi \right] \cdot \mu t.}$$

Аналогичные расчеты для дырочного полупроводника дают для напря-  
жения и вольт-амперной характеристики следующие выражения:

$$I_p(t) = \frac{2l_0(1 - e^{-\tilde{\Delta\varphi}}) + \tilde{\Delta\varphi}(l - 2l_0)}{q\mu n_0 \cdot S \cdot \tilde{\Delta f}} \cdot V_{вн}(t) \approx \frac{l - 2l_0}{q\mu n_0 \cdot S} \cdot V_{вн}(t), \quad (6-2)$$

$$E_{кр}(t) = \frac{V_{вн}(t)}{\left[ 2l_0 + (l - 2l_0) \cdot \frac{\tilde{\Delta\varphi}}{1 - e^{-\tilde{\Delta\varphi}}} \right] \Delta_{кр}(t)} \pm \frac{\tilde{\Delta\varphi}_k}{l_0 \cdot \Delta_{кр}(t)}, \quad (10-2)$$

где

$$\Delta_{кр}(t) = 1 + \sqrt{1 + \left[ \frac{V_{вн}(t)}{2l_0 + (l - 2l_0) \frac{\tilde{\Delta\varphi}}{1 - e^{-\tilde{\Delta\varphi}}}} \pm \tilde{\Delta\varphi}_k \right] \mu \cdot t.}$$

В случае когда  $\varphi_n > \varphi_p$ , выражения (6-2) и (10-1) справедливы для дырочного, а (6-1)—(10-1)—для электронного полупроводника, следует учесть только, что в членах перед  $\Delta\varphi_k$  знак «+» будет относиться к аноду, а «—» к катоду, знак же перед квадратной скобкой в выражении  $\Delta(t)$  имеет прианодное значение.

Полученные выражения для вольт-амперных характеристик правильно описывают эффект выпрямления в системе металл—полупроводник (диэлектрик) — металл. Область их применимости ограничивается процессами истощения слоя у анода, но при этом, видимо, нарушается условие (2). Полученные выражения были применены одним из авторов для качественного объяснения развития предпробойных условий в некоторых высокоомных полупроводниках [5], при этом с изложенной точки зрения удалось объяснить широкий круг экспериментальных данных (включение материала и полярности электродов, относительная величина электрической прочности, влияние температуры). Детальный анализ полученных соотношений является целью дальнейшей работы.

Обозначения:

$$\tilde{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi(x)}{kT} \text{ — распределение потенциала контактного заряда,}$$

$l_0$  — длина области объемного заряда,  
 $l$  — длина образца,

$$\tilde{\Delta\varphi}_k = \frac{\Delta\varphi_k}{kT} \text{ — контактная разность потенциалов,}$$

$n$  — концентрация электронов,  
 $n_0$  — концентрация электронов в объеме,  
 $q$  — заряд электрона,  
 $\mu$  — подвижность,  
 $S$  — площадь контакта  
 $R_k$  — контактное сопротивление,  
 $R_0$  — объемное сопротивление,  
 $I_n(t)$  — электронный ток,  
 $V_{вн}(t)$  — внешнее напряжение,  
 $V_k(t)$  — падение напряжения на контакте,  
 $V_0(t)$  — падение напряжения в объеме образца,  
 $l_k(t)$  — длина контактной области,  
 $t$  — время,  
 $T$  — абсолютная температура,  
 $\Delta(t)$  — функция ответа области объемного заряда на внешнее воздействие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Губанов. Теория выпрямляющего действия полупроводников. ГИТТЛ, М., 1956.
2. С. А. Еремин, О. К. Мокеев, Ю. Р. Носов. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение. «Советское радио», 1966.
3. Э. И. Андрович. ФТП, I, вып. II, 1620 (1967).
4. С. М. Рывкин. Фотоэлектрическое явление в полупроводниках. Физматгиз, М., 1963.
5. Ю. И. Сухушин, Ю. А. Захаров. Физика горения и взрыва (в печати).

## ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
3	18 сверху	10 Мгц и до $5 \cdot 10^{-4}$ — — $5 \cdot 10^{-3}$ %	10 Мгц до $5 \cdot 10^{-4}$ — — $5 \cdot 10^{-3}$
3	7 снизу	2	3
3	7 снизу	3	2
16	4 снизу	Сборник трудов ТИРЭТА ( в печати )	Известия ТПИ, т. 171, 1968
30	5 сверху	Т	ПТ <sub>2</sub>
31	5 сверху	Т <sub>2</sub> +	— Т <sub>2</sub> =
34—35	во всех случаях	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>φ</sub>