

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)

$$n = n_0 \exp \left[-\tilde{\Delta\varphi}_k \left(1 - \frac{x}{l_d} \right) \right]. \quad (2)$$

Сопротивление такого контактного слоя будет

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

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

$$R = R_0 + 2R_k$$

или

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

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

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

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

$$V_k(t) = \frac{l_0 \cdot V_{\text{вн}}(t)}{2l_0 + (l - 2l_0) \frac{\tilde{\Delta f}}{\tilde{\Delta\varphi} - 1}} \pm \Delta\varphi_k, \quad (7)$$

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

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 $E_i = \frac{V_i}{l_i} \pm E_{ko}$ дает иско-
мое распределение погрешностей

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

где

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

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

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

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

где

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

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:

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

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

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

n — концентрация электронов,
 n_0 — концентрация электронов в объеме,
 q — заряд электрона,
 μ — 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. Сухущин, 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 ТИРиЭТа (в печати)	Известия ТПИ, т. 171, 1968
30	5 сверху	Т	ПТ ₂
31	5 сверху	$r_{\Sigma} +$	$r_{\Sigma} =$
34—35	во всех случаях	Δ_f	Δ_{ϕ}