

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОКА РЕКОМБИНАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ДЛЯ РЕЗКОАССИМЕТРИЧНОГО P-N ПЕРЕХОДА

Слипченко Н.И., Герасименко Н.В., Донченко А.Л., Рыбалко С.А.  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. МЭПУ,  
тел. (057) 702-13-43,  
E-mail: cntm@ukr.net

In the paper the possibility of improved analytical estimates of the recombination current was investigated. An analytical assessment of the current recombination for an abrupt asymmetric semiconductor p-n junction in the space charge region in the justice of approach the space charge region of the Schottky was obtained. This assessment of possible to reduce the maximum error of more than 50 times, compared with a standard evaluation. Analytical estimation of recombination current will find wide application at the assessment recombination currents semiconductor junctions.

## Введение

В практике моделирования фотопреобразователей (ФП) довольно часто встречается задача оценки тока рекомбинации в области пространственного заряда кремневого полупроводникового перехода. Существующие на данный момент численные оценки тока рекомбинации отличаются низкой скоростью вычислений, что не всегда приемлемо в силу необходимости многомерной параметрической оптимизации ФП [1]. Существующие простейшие аналитические оценки [1-4] не дают достаточной точности уровня концентрации ловушек рекомбинации в полупроводниках (ПП) и необходимой крутизны вольтамперной характеристики (ВАХ) ФП при полном диапазоне вариации напряжения в области пространственного заряда (ОПЗ).

Проанализировав случаи применения оценки тока рекомбинации, были выявлены следующие отличительные особенности задач, дающие упрощение оценки без больших погрешностей при идеализации задачи:

6. уровни рекомбинации расположены близко к середине запрещённой зоны, что позволяет приравнять коэффициенты рекомбинации для электронов и дырок. В контексте кремния будем иметь численные оценки безызлучательной рекомбинации, приведенные в литературе [3-5];

7. полупроводниковый переход имеет резкую асимметрию, что даёт возможность рассматривать профили концентрации только в низколегированной области полупроводникового перехода.

## Основная часть

В работе исследовался резкоасимметричный полупроводниковый переход в приближении ОПЗ. Для расчетов использовались следующие выражения:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{q_e \cdot N_d} \cdot (\Delta\phi_{ipDob} + \Delta\phi_{ni} - U)} \quad \text{– толщина ОПЗ,}$$

где  $\Delta\phi_{ipDob}$  – добавочная контактная разность потенциалов (КРП) высоколегированной области относительно собственного ПП,  $\Delta\phi_{ni}$  – КРП слаболегированной донорной области относительно собственного ПП,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость ПП;

$$E'_{zn} = -\frac{q_e \cdot N_d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad \text{– градиент электрического поля в ОПЗ,}$$

где  $N_d$  – концентрация доноров в низколегированной области;

$E_n(x) = -E'_{zn} \cdot (x - \delta_n)$  – профиль электрического поля в ОПЗ;

$$\Delta\varphi_n(x) = -E_{in} \cdot \frac{(x - \delta_n)^2}{2} - \text{профиль приращения электрического потенциала}$$

ОПЗ, относительно границы раздела ОПЗ и квазинейтральной области.  
В результате анализа профилей рекомбинации через ловушки было выявлено координату максимального сечения рекомбинации в области пространственного заряда:

$$x_{\max} = \delta_n - \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{q_e \cdot N_{id}} \cdot (2 \cdot \ln(\frac{N_{id}}{n_i}) - U)}$$

При получении аналитических приближений было принято, что основная рекомбинация в области пространственного заряда сосредоточена в окрестности сечения максимальной рекомбинации (СМР), причём мы полагаем, что в окрестности максимальной рекомбинации электрическое поле постоянно:

$$E_{\max} = E_n(x_{\max});$$

$\Delta\phi_{\max} = \Delta\phi(x_{\max})$  – приращение потенциала в СМР;

$\Delta\phi_{n\_apr}(x) = \Delta\phi_{\max} - E_{\max} \cdot (x - x_{\max})$  – аппроксимационный профиль потенциала.

В результате расчетов была получена серия аналитических уточнений для тока рекомбинации в ОПЗ, которые выражаются через следующие вспомогательные коэффициенты:

$$k = -\frac{E_{\max}}{\phi_i}; \quad a = \gamma \cdot L \cdot n_i^2 \cdot (e^{U/\phi_i} - 1);$$

$$b = n_{n0} \cdot e^{\frac{\phi_{\max} + E_{\max} \cdot x_{\max}}{\phi_i}}; \quad c = p_{n0} \cdot e^{\frac{U}{\phi_i}} \cdot e^{-\frac{\phi_{\max} + E_{\max} \cdot x_{\max}}{\phi_i}};$$

$$d = N_c \cdot \exp\left(\frac{E n_{i_c}}{k_b \cdot T}\right) + N_v \cdot \exp\left(\frac{E p_{i_v}}{k_b \cdot T}\right); \quad R_{lov\_apr}(x) = \frac{a}{b \cdot e^{k \cdot x} + c \cdot e^{-k \cdot x} + d}$$

где  $\phi_i$  – температурный потенциал,  $\gamma$  – коэффициент безызлучательной рекомбинации,  $L$  – концентрация рекомбинационных ловушек,  $n_i$  – собственная концентрация носителей,  $n_{n0}$  – концентрация электронов в донорном полупроводнике,  $N_c$  и  $N_v$  – плотности квантовых состояний в зоне проводимости и валентной зоне,  $E n_{i_c}$  и  $E p_{i_v}$  – энергия уровня ловушки в электронных и дырочных отсчётах соответственно.

Аппроксимационный профиль рекомбинации имеет аналитическую первообразную:

$$\int \frac{a}{b \cdot e^{k \cdot x} + c \cdot e^{-k \cdot x} + d} dx = \frac{2 \cdot a \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot b \cdot e^{k \cdot x} + d}{\sqrt{4 \cdot c \cdot b - d^2}}\right)}{k \cdot \sqrt{4 \cdot c \cdot b - d^2}}$$

В двухобластном приближении, пренебрегая концентрацией подвижных носителей на уровнях ловушек, допустимо следующее аналитическое выражение для тока рекомбинации в ОПЗ:

$$j_{app} = \frac{q_e \cdot a}{k} \cdot \left( \frac{e^{k \cdot x_{\max}}}{c} + \frac{e^{-k \cdot x_{\max}}}{b} \right)$$

При расчёте модели рекомбинации в ОПЗ были взяты следующие исходные данные:

$$N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad \Delta\phi_{\text{прДоб}} = 0.6 \text{ В}, \quad L = 10^{12} \text{ см}^{-3}, \quad E_{\text{пл}} = -0.56 \text{ эВ}, \quad \gamma_r = 3.3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с},$$

$d = 150 \text{ мкм}$ .

Результаты аналитических оценок представлены на графике (рис 1). Из приведённых результатов численного эксперимента видно, что для типичной толщины (100-300 мкм) ФП, при типичных напряжениях (0,4-0,6 В) – ток рекомбинации в ОПЗ намного меньше тока рекомбинации на ловушках в квазинейтральной области. Из этого следует, что для солнечных элементов с типичными толщинами можно пренебречь током рекомбинации в ОПЗ.

Из сопоставления элементарной оценки с аппроксимационными оценками, необходимо заметить, что они ведут себя, как функции с экспоненциальным множителем  $e^{\frac{U}{2k_b T}} \dots e^{\frac{U}{k_b T}}$ , что и соответствует аппроксимационному параметру опытных данных ВАХ с коэффициентом идеальности  $m = 1 \dots 2$  [3]. Опытный коэффициент идеальности в отличие от параметра аппроксимации имеет постоянное значение. При точном учёте тока рекомбинации для значения этого параметра имеются две подобласти вариации напряжения:

- подобласть, в которой преобладает рекомбинация в ОПЗ с коэффициентом идеальности  $m = 1 \dots 2$ ;
- подобласть, в которой преобладает рекомбинация в квазинейтральной области с коэффициентом идеальности  $m = 0,5 \dots 2$ . Следует отметить, что в этой области рекомбинация будет зависеть от толщины квазинейтральной области, скорости рекомбинации на тыльном контакте и профиля функции генерации в полупроводнике.

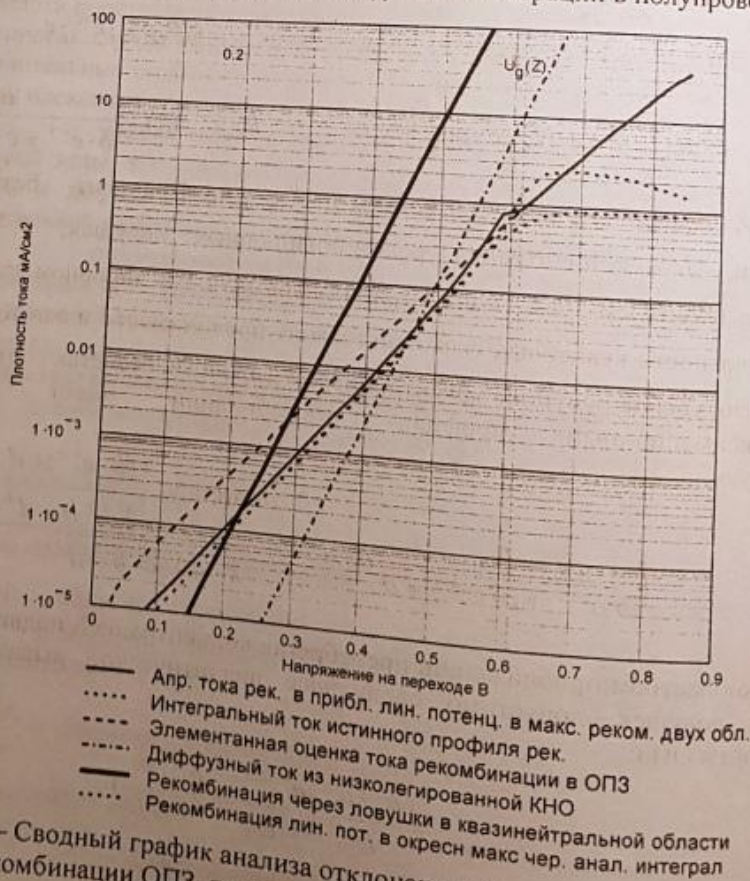


Рис. 1 — Сводный график анализа отклонения аналитических оценок от рекомбинации ОПЗ, полученной численными методами

Рассчитана погрешность аналитической оценки тока рекомбинации в ОПЗ (рис. 2) относительно численного интегрирования профиля рекомбинации в ОПЗ.

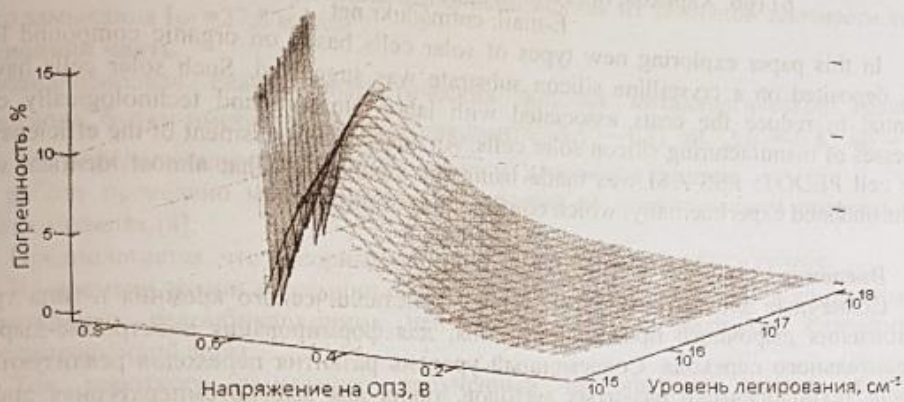


Рис. 2 — Погрешность в процентах аналитической оценки тока рекомбинации через аналитическую первообразную от напряжения на ОПЗ при разных уровнях легирования

#### Выводы

В данной работе подтверждена возможность уточнения аналитической оценки рекомбинационного тока через ловушки в области пространственного заряда. При такой оценке максимальная погрешность уменьшается более чем в 50 раз, по сравнению со стандартной оценкой. При этом погрешность возрастает, когда сечение (координата) максимальной рекомбинации приближается к квазинейтральной области.

В процессе поиска уточняющей аналитической оценки было выявлено, что ее возрастающая погрешность возникает при переходе сечения максимальной рекомбинации от области пространственного заряда к квазинейтральной области, что связано с погрешностью модели Шотки. Её можно снизить надлежащими уточнениями, однако в этой области первостепенную роль играют другие факторы:

- необходимо учесть распределение подвижных носителей в области пространственного заряда, причём обоих знаков. Но в силу обширности этой темы она не может быть отражена в данной работе;

- токи, протекающие через полупроводниковый переход.

Но, даже пренебрегая данными уточнениями, аналитическая оценка тока рекомбинации найдёт широкое применение при учёте токов рекомбинации полупроводниковых переходов.

#### Список литературы:

1. Бубенников А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий приборов и схем. М.: Высшая школа 1989. 319с.
2. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи (Москва: Сов. Радио: 1971).
3. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов : пер. с англ. Москва «Мир» 1984. Т1 455с., Т2 455с.
4. Стриха, В.И. Контактные явления в полупроводниках : учеб. пособие / Стриха В.И. - К. : Вища школа - 1982. - 223с.
5. Абакумов В. Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках С.-Петербург 1997 - 373с.