

ЭФФЕКТ ЗАПИРАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПРИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ

Епифанов М. С., Шипилин А. В., Шленский В. Н.

Рассмотрена одномерная численная модель полупроводникового фотоэлектрического преобразователя с учетом отклонения от приближения квазинейтральности, а также нелинейной рекомбинации неравновесных носителей заряда (ННЗ). Показано, что в n^+p-p^+ -слое на основе кремния при высоком уровне возбуждения в режиме короткого замыкания (КЗ) область с пониженной концентрацией ННЗ находится не вблизи n^+p -перехода, как при низком уровне возбуждения, а вблизи $p-p^+$ -перехода. При некотором промежуточном уровне возбуждения концентрация ННЗ снижается вблизи как n^+p -, так и $p-p^+$ -переходов, что может быть использовано для увеличения КПД преобразования за счет повышения коэффициента сбора ННЗ.

На рис. 1 приведена ступенчатая структура с тонкими приповерхностными сильно легированными n^+ - и p^+ -слоями (толщинами w_n и w_p соответственно) и базовой областью n - или p -типа (толщиной w). На внешних сторонах n^+ - и p^+ -областей имеются металлические контакты (M).

Для описания распределения носителей заряда в структуре использована следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{1}{q} \frac{dj_n}{dx} &= R - G, & \frac{1}{q} j_n &= D_n \frac{dn}{dx} - \mu_n \frac{d\varphi}{dx} n, \\ \frac{1}{q} \frac{dj_p}{dx} &= G - R, & \frac{1}{q} j_p &= -D_p \frac{dp}{dx} - \mu_p \frac{d\varphi}{dx} p, \\ \frac{1}{q} \frac{d^2\varphi}{dx^2} &= \frac{4\pi}{\epsilon} (n - p - N), \\ R &= (n - n_0) (A/\lambda + C_p p^2) + (p - p_0) (A/2 + C_n n^2) \end{aligned}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \frac{1}{q} j_n(-w_n) &= J + S_n(p - p_0), & \frac{1}{q} j_p(-w_n) &= -S_n(p - p_0), \\ \frac{1}{q} j_n(w + w_p) &= -S_p(n - n_0), & \frac{1}{q} j_p(w + w_p) &= J + S_p(n - n_0), \\ \varphi(-w_n) &= 0, & \varphi(w + w_p) &= \varphi_0, \end{aligned}$$

где n , p — полные концентрации электронов и дырок соответственно; n_0 , p_0 — их равновесные концентрации; D_n , D_p — коэффициенты диффузии; μ_n , μ_p — подвижности; A , C_n и C_p — коэффициенты линейной и оже-рекомбинаций; S_n и S_p — скорости поверхностной рекомбинации на контактах к n^+ - и p^+ -областям соответственно; j_n и j_p — плотности электронного и дырочного токов; $J = j_n + j_p$ — полная плотность тока; G и R — скорости генерации и рекомбинации ННЗ; N — концентрация связанных носителей заряда (предполагается равной концентрации нескомпенсированной мелкой примеси); $N = N_D - N_A$; φ — электростатический потенциал; q — заряд электрона; ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Величина G предполагалась постоянной, не зависящей от координаты x , что соответствует случаю высоковольтного матричного фотоэлектрического преобразователя [1].

Представленная краевая задача решалась численно с использованием итерационного метода Гуммеля [2]. При этом использовались специальные аппроксимации дифференциальных уравнений, позволяющие рассчитывать уравнения на $n^+ - p$ - и $p - p^+$ -переходах [3, 4] со сгущением сетки в этих областях.

На рис. 2 представлены результаты расчета распределения ННЗ в структуре для трех интенсивностей освещения при следующих исходных параметрах: $\mu_n = 1500$, $\mu_p = 600$ см²/В·с; $w_n = w_p = 1.1$, $w = 110$ мкм; $S_n = 2 \cdot 10^4$, $S_p = 2 \cdot 10^4$ см/с; $C_n = 2 \cdot 10^{-31}$, $C_p = 10^{-31}$ см⁶/с; в базовой области $A = 2 \cdot 10^6$ с⁻¹, $p_0 = -N = 10^{14}$ см⁻³; в n^+ -слое $A = 4 \cdot 10^6$ с⁻¹, $n_0 = N = 10^{18}$ см⁻³; в p^+ -слое $A = 4 \cdot 10^6$ с⁻¹, $p_0 = -N = 10^{18}$ см⁻³.

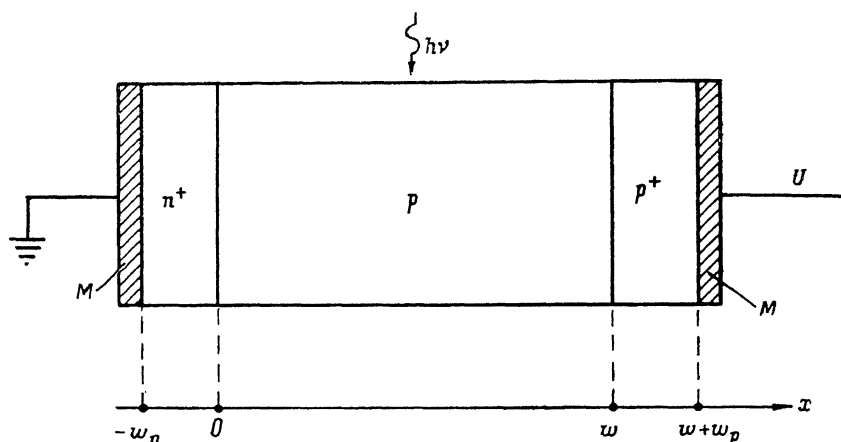


Рис. 1. Схема фотопреобразователя.

Как видно из рис. 2, распределения ННЗ при низком и высоком уровнях освещения существенно различаются, а именно если при низком уровне освещения концентрация ННЗ в режиме короткого замыкания резко снижается при приближении из объема базовой области к $n^+ - p$ -переходу, то при высоком уровне освещения — при приближении к $p - p^+$ -переходу. Аналогичное поведение распределения ННЗ наблюдается и в режиме, соответствующем рабочей точке ВАХ ФП. Такое изменение характера распределения ННЗ с интенсивностью освещения обусловлено различием подвижностей электронов и дырок в кремнии и возникновением ЭДС Дембера.

Указанный эффект «запирания» электронов приводит к двум важным следствиям.

1. При высокой интенсивности освещения в отличие от низкой на величину тока короткого замыкания влияет качество не $p - p^+$, а $n^+ - p$ -перехода.

2. При некоторой промежуточной интенсивности освещения концентрация ННЗ в режиме КЗ и в рабочей точке ВАХ снижается при приближении как к $n^+ - p$ -, так и к $p - p^+$ -переходам. Уменьшенная концентрация ННЗ вблизи обеих границ базовой области приводит к снижению рекомбинации на этих границах, т. е. к повышению КПД. В этом промежуточном режиме освещения происходит также относительное ослабление влияния объемной рекомбинации в базовой области ФП. Действительно, сборение ННЗ из объема базовой области ФП при любом уровне возбуждения определяется диффузией носителей заряда (хотя и с разными коэффициентами диффузии при различных уровнях возбуждения). При низком и высоком уровнях освещения собирающим является только один переход, поскольку только около него концентрация ННЗ существенно снижается (до нуля в режиме короткого замыкания). В промежуточном же режиме концентрация ННЗ в режиме КЗ и в рабочем режиме существенно снижается вблизи обеих границ базовой области, т. е. в результате диф-

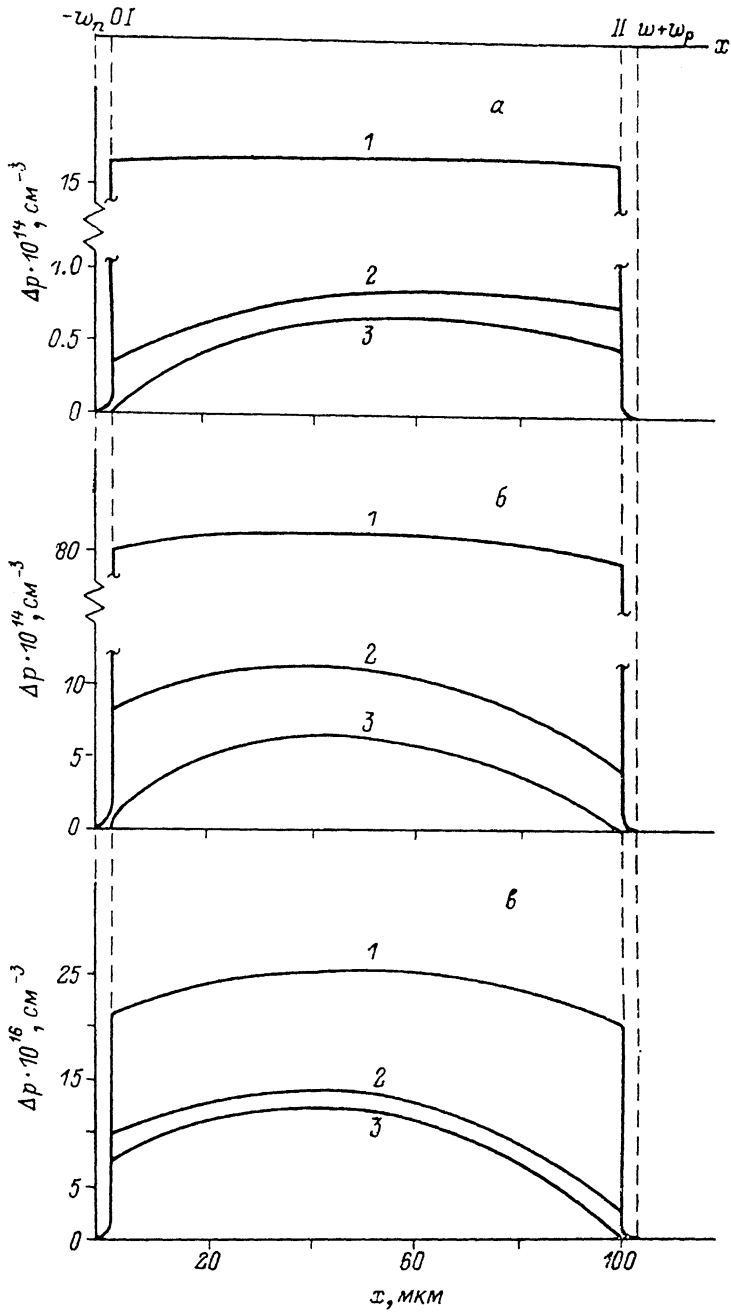


Рис. 2. Распределение зарядов в ФП.

Режим: *a* — слабого, *б* — промежуточного, *в* — сильного возбуждений. 1 соответствует режиму холостого хода ВАХ ФП, 2 — рабочей точке ВАХ, 3 — режиму короткого замыкания. Сечения *I* и *II* относятся к переходам: *I* — $n^+ - p$, *II* — $p - p^+$.

фузии носители заряда из объема базовой области перемещаются к обоим переходам, которые являются собирающими.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента собирания и условного КПД преобразования (в предположении, что энергия фотона преобразуемого излучения равна ширине запрещенной зоны кремния) от скорости генерации ННЗ. Видно, что в области промежуточных интенсивностей освещения наблюдаются максимум коэффициента собирания и КПД преобразования ФП.

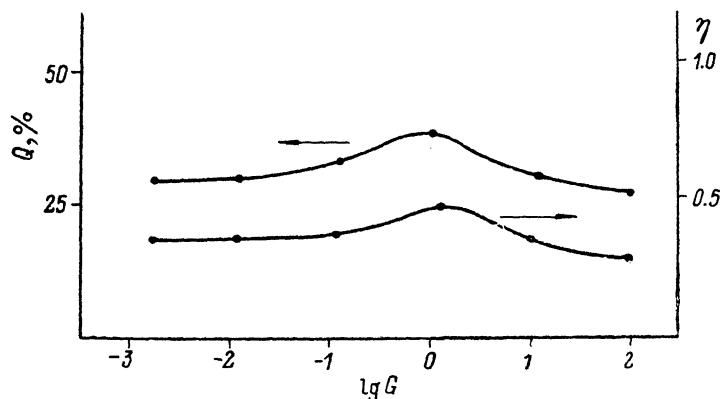


Рис. 3. Зависимость коэффициента собирания Q и КПД ФП от скорости генерации ННЗ G .

Значения G отнесены к $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, показано, что в промежуточном режиме освещения путем подбора интенсивности освещения при фиксированном уровне легирования базовой области ФП или уровня легирования при фиксированной интенсивности можно существенно повысить КПД преобразования ФП.

Список литературы

- [1] Ландсман А. П., Стребков Д. С. // Гелиотехника. 1970. № 2. С. 21—23.
- [2] Gummel H. K. // IEEE Trans. 1964. V. ED-11. P. 455—465.
- [3] Scharfetter D. L., Gummel H. K. // IEEE Trans. 1969. V. ED-16. P. 64—67.
- [4] Майоров С. А., Руденко А. А., Шипилин А. В. // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20. В. 1. С. 112—120.

Вычислительный центр АН СССР
Москва

Получена 21.02.1990
Принята к печати 23.02.1990