

УДК 621.381

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ РЕКОМБІНАЦІЇ В $p - p^+$ ПЕРЕХОДІ КРЕМНІЄВОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

С. Л. Хрипко

Гуманітарний університет “ЗІДМУ”
вул. Жуковського, 70-б, 69002, Запоріжжя, Україна
E-mail: serg_992000@mail.ru

Анотація

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ РЕКОМБІНАЦІЇ В $p - p^+$ ПЕРЕХОДІ КРЕМНІЄВОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

С. Л. Хрипко

Описано модель визначення швидкості поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду в $p - p^+$ переході кремнієвого фотоперетворювача. Враховані головні фактори, що впливають на величину рекомбінації. Проведена перевірка моделі показала повну відповідність до експериментальних результатів

Ключові слова: поверхнева рекомбінація, носії заряду, фотоперетворювач, $p - p^+$ перехід.

Summary

SURFACE RECOMBINATION MODELLING IN $p-p^+$ TRANSITION OF THE SILICON PHOTOCONVERTER

S. L. Khripko

An model for determination of minority carrier surface recombination velocity at $p-p^+$ junction of the silicon solar cell is proposed. Primary factors, which influence on value of the recombination, took into account. The theoretical values are in good agreement with experimental.

Key words: surface recombination, carriers, solar cell, $p-p^+$ junction.

Аннотация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБІНАЦИИ В $p - p^+$ ПЕРЕХОДЕ КРЕМНІЄВОГО ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

С. Л. Хрипко

Описана модель для определения скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда в $p-p^+$ переходе кремнієвого фотопреобразователя. Модель учитывает главные факторы, которые влияют на величину рекомбинации. Проведенная проверка модели показала полное соответствие теории с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: поверхностная рекомбинация, носители заряда, фото преобразователь, $p - p^+$ переход.

Вступ

Одним з важливих параметрів, що впливає на ефективність фотоелектричних перетворювачів (ФП) є швидкість поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду (s) [1-4]. Вплив поверхневої рекомбінації на час життя неосновних носіїв заряду стає суттєвим, коли кількість електронно-діркових пар, що рекомбінують на поверхні за одну секунду, складає значну частину від загальної кількості носіїв заряду. Тому вплив поверхневої рекомбінації буде особливо помітним у випадку тонких шарів, які мають велике співвідношення поверхні до об'єму [5]. Проблема точного визначення s особливо важлива для кремнієвих ФП з вбудованим електричним полем тильної поверхні. Тому в деяких роботах використовують вимірне значення s [6, 7] але в більшості випадків розраховують самотужки або використовують теоретичні дані, одержані іншими авторами [8-10]. Розроблені моделі як правило не враховують одночасний вплив на s таких факторів, як рекомбінація неосновних носіїв заряду в високолегованій p^+ - області, рекомбінація неосновних носіїв заряду в області просторового заряду (ОПЗ) p - p^+ - переходу, вбудоване електричне поле в p - p^+ - переході.

Мета роботи полягає в одержанні виразу для розрахунків швидкості поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду в p - p^+ - переході ФП з урахуванням ефектів рекомбінації та вбудованого поля і в порівнянні одержаних результатів обчислень з експериментальними значеннями.

Теоретичний підхід

Структура кремнієвого n^+ - p - p^+ - ФП, яка наведена на рис 1, складається з n^+ - p - переходу, високоомної бази та ізотопного p - p^+ - переходу.

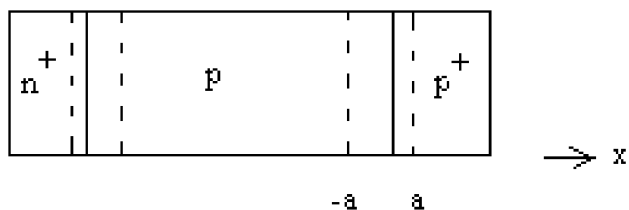


Рис. 1. Структура кремнієвого ФП.

Запишемо рівняння Пуассона [11] для ділянок $-a$ та a окремо

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{e[p(x) - N_A]}{\varepsilon_r}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = -\frac{e[p(x) - N_{A+}]}{\varepsilon_r}, \quad (2)$$

де φ – електричний потенціал в ОПЗ; E – електричне поле; x – координата; e – заряд електрона; $p(x)$ – концентрація дірок вздовж вісі x ; N_A та N_{A+} – концентрація акцепторних домішок в p та p^+ – ділянках, відповідно; $\varepsilon_r = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$; ε – відносна діелектрична проникність напівпровідника; ε_0 – електрична стала, знак мінус належить ділянці, що розташована ліворуч від p - p^+ - переходу. Ширина збідненої ділянки з кожного боку переходу зворотно пропорційна відповідній концентрації домішок. Для вирішення рівнянь (1) та (2) треба врахувати неперервність електричного поля E і потенціалу φ в точці $x=0$, а також відсутність електричного поля поза ОПЗ та на межах $E(-a)$ і $E(a)$. Для знаходження концентраційного розподілу дірок ліворуч та праворуч від p - p^+ - переходу треба скористуватись розподілом Максвелла – Больцмана та умовами Шоклі. В такому випадку одержимо:

$$p(x) = N_A \exp\left[\frac{e(\varphi_p - \varphi)}{kT}\right], \quad (3)$$

$$p(x) = N_{A+} \exp\left[-\frac{e(\varphi_d - \varphi_p + \varphi)}{kT}\right], \quad (4)$$

де φ_p, φ_d – потенціали на електронейтральному краю збідненої ділянки ліворуч та праворуч p - p^+ - переходу, відповідно, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура. За допомогою інтегрування рівнянь (1) і (2) одержимо наступні вирази для ділянок ліворуч і праворуч відповідно

$$E = \left(\frac{2eN_A}{\varepsilon_r} \cdot \left(\varphi + \frac{kT}{e} \cdot \exp\left(\frac{e\varphi_p}{kT}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right) - 1 \right) \right) \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$E = \left(\frac{2eN_{A+}}{\varepsilon_r} \cdot \left(\left((\varphi + \varphi_d - \varphi_p) + \frac{kT}{e} \right) \times \left(\exp\left(-\frac{e(\varphi + \varphi_d - \varphi_p)}{kT}\right) - 1 \right) \right) \right)^{1/2}, \quad (6)$$

Далі використаємо рівняння неперервності для неосновних носіїв заряду в ОПЗ ($p \gg n$)

$$\frac{dJ_n}{dx} = -e \frac{n(x)}{\tau_{n0}}, \quad (7)$$

де τ_{n0} – час життя неосновних носіїв заряду в ОПЗ, $n(x) = n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right)$. Інтегрування рівняння (7) веде до густини рекомбінаційного струму

$$J_r = -\frac{en_0}{\tau_{n0}} \int \frac{\exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right)}{\frac{d\varphi}{dx}} dx, \quad (8)$$

З рівняння (8) можна одержати два рівняння для густин рекомбінаційних струмів ділянок, що розташовані ліворуч та праворуч від $p-p^+$ –переходу, відповідно

$$J_{nrp^+} = -\frac{eD_{np^+}}{L_{np^+}} (n_K - n_{p^+}) \operatorname{cth}\left(\frac{x}{L_{np^+}}\right), \quad (9)$$

де D_{np^+} – коефіцієнт дифузії електронів в p^+ – ділянці, L_{np^+} – дифузійна довжина електронів в p^+ – ділянці, $n_K = \frac{(n_0 + N_A)n_0}{N_{A+}} \gg n_{p^+}$,

$$J_{npp} = -es(n_0 - n_p), \quad (10)$$

Таким чином, маємо остаточний вираз для розрахунків s:

$$s = \frac{N_A D_{np^+}}{N_{A+} L_{np^+}} \operatorname{cth}\left(\frac{x}{L_{np^+}}\right) + \frac{n_K D_{np^+}}{N_{A+} L_{np^+}} \operatorname{cth}\left(\frac{x}{L_{np^+}}\right) + \frac{\pi}{4\tau_{nA}} \left(\frac{2kT\epsilon_r}{e^2(N_A + n_0)}\right)^{1/2} + \frac{1,46(N_A + n_0)}{\tau_{nD} N_{A+}} \left(\frac{2kT\epsilon_r}{e^2 N_{A+}}\right)^{1/2}, \quad (11)$$

де τ_{nA}, τ_{nD} – час життя неосновних носіїв заряду в ділянці ліворуч і праворуч від $p-p^+$ –переходу.

Експериментальна перевірка

Для перевірки одержаного виразу нами були взяті експериментальні результати по вимірюванню s в роботі [7]. Для ФП з кремнію p – типу з питомим опором $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, концентрацією бору в базі $N_A = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрацією бору в p^+ – ділянці $N_{A+} = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $\tau_{mz} = (0,8 - 3,5) \cdot 10^{-4} \text{ с}$, $L_{np} = (1 - 2) \cdot 10^{-4} \text{ с}$ експериментальні значення s становили $170 - 473 \text{ см/с}$, а значення,

які були одержані в нашій роботі становили $160 - 480 \text{ см/с}$. Теоретичні значення повністю охоплюють діапазон експериментальних і знаходяться у повній відповідності.

Висновки

В роботі вперше одержано вираз для швидкості поверхневої рекомбінації неосновних носіїв заряду в $p-p^+$ ділянці, який враховує рекомбінаційні процеси в високолегованій p^+ – області та в області просторового заряду (ОПЗ) $p-p^+$ – переходу, а також вбудоване електричне поле в $p-p^+$ – переході. Практично, це дає можливість більш точно розраховувати спектральний відгук, струм короткого замикання та напругу холостого ходу фотоперетворювачів з бар'єром поблизу тильної поверхні. Швидкість поверхневої рекомбінації визначається значною мірою рекомбінаційними процесами в ОПЗ $p-p^+$ – переходу. Інші механізми впливають на швидкість поверхневої рекомбінації меншою мірою. Проте нехтувати ними не рекомендується.

Бібліографічні посилання

1. Fossum J.G., Lindholm F.A., Shibib M.A. The importance of surface recombination and energy-bandgap narrowing in p-n-junction silicon solar cells // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1979. – V. ED-26, –№9. – P.1294-1298.
2. Cid M., Ruiz J.M. Study of injection effects on BSF silicon solar cells // IEEE Trans. on Electron Devices. –1989. – V. ED-36, –№9. – P.507-513.
3. Pelanchon F., Mialhe P. Optimization of solar cell performance // Solid-State Electronics. – 1990. – V.33, –№ 1. – P.47-51.
4. Green M.A. Silicon solar cells: evolution, high efficiency design and efficiency enhancements // Semicond. Sci. Technol. – 1993. – V.8, –P.1-12.
5. Киреев П.С. Физика полупроводников. – М., 1969. – 592 с.
6. Neugroschel A. Determination of lifetimes and recombination currents in p-n junction solar cells, diodes and transistors// IEEE Trans. on Electron Devices. – 1981. – V. ED-28, –№1. – P.108-115.
7. Rose B.H. Minority-carrier lifetime measurements on silicon solar cells using I_{sc} and V_{oc} transient decay // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1984. – V. ED-31, –№5. – P.559-565.
8. Soliman M.Y., Habib S.E. – D. Surface recombination velocity in MINP solar cells // Solid-

- State Electronics. — 1987. — V.30, —№6. — P.663-666.
9. Jain S.C., Tsao J., Kerwin W.J. The spectral response and efficiency of heavily doped emitters in silicon photovoltaic devices // Solid-State Electronics. — 1987. — V.30. — №9. — P.927-937.
10. Rohatgi A.R., Ray-Choudhury P. An approach toward 20-percent-efficiency silicon solar cells // IEEE Trans. on Electron Devices. — 1986. — V. ED-33. — №1. — P.1-7.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М., 1984. — 456 с.