

УДК 621.3

ВЫЧИСЛЕНИЕ ФОТОТОКА, ГЕНЕРИРУЕМОГО В АКТИВНОМ *i*-РЕГИОНЕ *p-i-n* СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

А.Л. ХАЧАТРЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 3 февраля 2004 г.)

Разработана модель для вычисления фототока в солнечных элементах с квантовыми точками. На ее основе показано, что квантовые точки в зависимости от их параметров и расположения могут являться как центрами генерации, так и центрами рекомбинации.

В нашей предыдущей работе [1] была представлена комплексная модель *p-i-n* солнечных элементов (СЭ) с квантовыми точками (КТ), строение которой изображено на рис.1. Для оценки генерационного и рекомбинационного тока в активном регионе солнечного элемента проведем детальный анализ предложенной модели. Примем, что КТ расположены слоями в *i*-регионе элемента (рис.1) и их поверхностная концентрация равна N_S . Допустим, что в СЭ есть M таких слоев, расположенных на расстоянии d друг от друга, разделяющих таким образом *i*-регион на M равных областей. Также примем, что слои с КТ (СКТ) расположены на переднем фронте этих областей (рис.1). Для простоты допустим, что энергетические уровни КТ возникают лишь вблизи зоны проводимости (рис.2). Как показано на рис.2, в подобной системе можно выделить следующие процессы: 1) захват электрона квантовой точкой, 2) выход электрона из КТ, 3) рекомбинация в КТ, 4) оптическая генерация в КТ. Скорости протекания вышеуказанных процессов в единицу времени на единицу площади СКТ обозначим следующим образом:

$$1. R_1 = \alpha n[(k-1)d]N_S(1-f_n),$$

$$2. R_2 = \beta N_S f_n,$$

$$3. R_3 = \gamma N_S (f_n - f_{n0}),$$

$$4. R_4 = \eta N_S (1-f_n),$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ – коэффициенты, описывающие соответствующие процессы, f_n – вероятность нахождения электрона в КТ, f_{n0} – вероятность нахождения электрона в КТ в условиях равновесия, а $n[(k-1)d]$ – концентрация свобод-

ных электронов у переднего фронта k -ой области. В общем случае справедливо следующее уравнение:

$$(R_1 - R_2) + (R_4 - R_3) = 0. \quad (1)$$

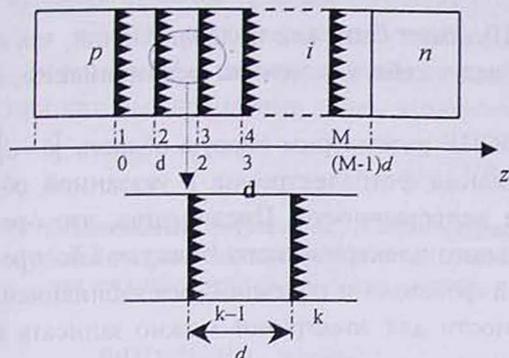


Рис.1. Структура p - i - n СЭ с КТ.

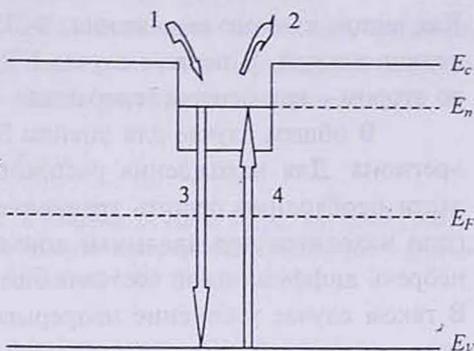


Рис.2. Энергетическая диаграмма КТ.

В условиях равновесия имеем $R_3 = R_4 = 0$, и из уравнения (1) следует

$$\alpha n_0 (1 - f_{n0}) - \beta f_{n0} = 0. \quad (2)$$

Если учесть, что

$$n_0 = N_c \exp\left[\frac{E_F - E_c}{kT}\right] \quad \text{и} \quad f_{n0} = \left[1 + \exp\left(\frac{E_n - E_F}{kT}\right)\right]^{-1}, \quad (3)$$

где E_F – энергия уровня Ферми, E_c – энергия края зоны проводимости, kT – энергия теплового движения электронов, а E_n – энергия квантового уровня в КТ, то можно получить

$$\beta = n_1 \alpha, \quad (4)$$

где

$$n_1 = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_n}{kT}\right]. \quad (5)$$

Учитывая выражение (4), из уравнения (1) можно найти вероятность нахождения электрона в КТ k -ого слоя:

$$f_n(k) = \frac{\alpha n[(k-1)d] + \gamma f_{n0} + \eta}{\alpha [n[(k-1)d] + n_1] + \gamma + \eta}. \quad (6)$$

Определим эффективную скорость поверхностной рекомбинации (ЭСР) на СКТ:

$$U_S = R_1 - R_2. \quad (7)$$

Учитывая (6), для ЭСПР можно получить

$$U_S(k) = \left[n[0, k] - \frac{(n[0, k] + n_1)(\alpha n[0, k] + \gamma f_{n0} + \eta)}{\alpha (n[0, k] + n_1) + \gamma + \eta} \right] N_S \alpha. \quad (8)$$

Как видно из этого выражения, ЭСПР может быть как положительной, так и отрицательной. В первом случае КТ ведут себя как центры рекомбинации, а во втором – как центры генерации.

В общем случае для оценки ЭСПР рассмотрим первую область $[0 - d]$ i -региона. Для нахождения распределения фотоэлектронов в указанной области необходимо решить уравнение непрерывности. Предполагая, что i -регион находится под влиянием локального электрического поля, можно пренебречь диффузионной составляющей фототока и объемной рекомбинацией. В таком случае уравнение непрерывности для электронов можно записать в виде

$$-\mu E \frac{dn(z, k)}{dz} = F(k, \lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)z], \quad (9)$$

где μ – подвижность электронов, $\alpha(\lambda)$ – коэффициент поглощения света в барьере, E – электрическое поле, $F(k, \lambda)$ – поток фотонов, падающий на k -ый слой (в данном случае $k=1$). Общим решением уравнения (9) является

$$n(z, k) = C_1 + \frac{1}{\mu E} F[\lambda, k] \exp(-\alpha(\lambda)z). \quad (10)$$

Здесь C_1 – постоянная, которая определяется из следующего граничного условия:

$$e \frac{2D_n}{L_{dn}} n(0, 1) = j_n^0 - eU_S(1), \quad (11)$$

где j_n^0 – поток электронов, поступающий из p -региона, известный из предыдущих работ [1,2]. Условие (11) означает, что на границе рассматриваемой области ток определяется разностью входящего тока и рекомбинационного (генерационного) тока в СКТ. Уравнение (11) решается, однако для постоянной C_1 мы получаем слишком сложное выражение, которое здесь не приводим. Наконец, имея концентрацию электронов, можно вычислить фототок в области $[0 - d]$ i -региона, в частности, в точке $z = d$. Очевидно, что в следующем слое ($k=2$) задача решается подобным образом, с той лишь разницей, что входной ток для этого слоя будет равен выходному току из предыдущего слоя. Обобщая (11), граничное условие для k -ой области можно представить в виде

$$e \frac{2D_n}{L_{dn}} n[0, k] = j_n^{(k-1)} - eU_S(k), \quad (12)$$

где $j_n^{(k-1)} = \frac{2D_n}{L_{dn}} \frac{dn[z, (k-1)]}{dz} \Big|_{z=d}$ – выходной ток области $(k-1)$.

В результате последовательного решения M раз уравнения (9) при граничном условии (12) получаем фототок на выходе M -той области, который является полным фототоком генерируемым в i -регионе.

Таким образом, разработанная модель позволяет вычислять фототок, генерируемый в активном регионе солнечного элемента. Приведены условия при которых квантовые точки являются генерационными центрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.Aroutiounian, S.Petrosyan, A.Khachatryan, K.Touryan. J. Appl. Phys., 89, 2268 (2001).
2. А.Л.Хачатрян. Материалы третьей национальной конференции. Полупроводниковая микроэлектроника. Севан, сентябрь 2001 г., с.146.

ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԵՏԵՐՈՎ $p-i-n$ ԱՐԵԳԱՆԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑՆԵՐԻ ԱԿՏԻՎ i -ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ ԳԵՆԵՐԱՑՎՈՂ ՖՈՏՈՏՈՐԱՆՈՍԱՆՔԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա.Լ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

Մշակված է մոդել բվանտային կետերով արեգակնային մարտկոցում գեներացվող ֆոտոհոսանքի հաշվելու համար: Ցույց է տրված, որ կախված բվանտային կետերի պարամետրերից և ակտիվ տիրույթում նրանց գրավված դիրքից, նրանք կարող են հանդիսանալ ինչպես գեներացման, այնպես էլ վերամիավորման կենտրոններ:

CALCULATION OF PHOTOCURRENT GENERATED IN THE ACTIVE i -LAYER OF QUANTUM-DOT $p-i-n$ SOLAR CELLS

A.L. KHACHATRYAN

A model for the photocurrent calculation in a QD based solar cell is developed. It is shown that, depending on the parameters and position of QDs inside the intrinsic region, they can be both the generation and recombination centers.