УДК 621.383.46

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Чеботарев С.Н., Мирющенко Н.И.

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

В программном пакете AFORS–HET 2.5 проведено численное моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов c-Si(n)/c-Si(p) от толщины d фронтального и тыльного слоя, температуры окружающей среды T, уровня легирования N_a фронтального слоя и уровня легирования N_d тыльного слоя для определения допустимого варьирования этих величин, обеспечивающих наибольшую эффективность преобразования солнечного излучения. Определены оптимальные параметры толщины фронтального слоя d = 300 нм, толщины тыльного слоя d = 500 мкм, уровня легирования фронтального слоя $N_a = 5{\cdot}10^{17}$ см$^{-3}$, уровня легирования тыльного слоя $N_d = 10{\cdot}19$ см$^{-3}$, в которых расчетный КПД исследуемых солнечных элементов не ниже 14%. Практический реализуемый КПД исследуемого кремниевого солнечного элемента может быть не меньше 12%.

Ключевые слова: моделирование, кремниевые солнечные элементы, эффективность, вольтамперная характеристика

NUMERICAL SIMULATION OF SILICON SOLAR CELLS FUNCTIONAL CHARACTERISTICS

Chebotarev S.N., Miryushchenko N.I.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

Numerical simulation of functional characteristics of c-Si(n)/c-Si(p) was carried out by free software AFORS–HET 2.5. Simulation was defined at different thicknesses of frontal and back layers, environment temperature, doping levels in frontal layer of acceptors N_a and donors N_d to estimate the higher efficiency of that solar cells. It was found that the theoretical efficiency of the solar cell under investigation is more than 14 percent at the thickness of the front layer of 300 nm, at the thickness of the back layer of 500 μm, at the doping level of the front layer of $N_a = 5{\cdot}10^{17}$ cm^{-3}, at the doping level of the back layer of $N_d = 10^{19}$ см$^{-3}$, at temperature of T = 250 K.

Keywords: simulation, silicon solar cells, efficiency, volt-ampere characteristics

Разработка и исследование источников альтернативной энергии является важной и актуальной научно-технической задачей. Наибольшие перспективы в этой области связывают с фотоэлектрическими преобразователями на основе простых [1] и сложных полупроводников [2]. Основными методами получения солнечных элементов являются молекулярно-лучевая эпитаксия [3], газофазное осаждение [4] и ионно-лучевая кристаллизация [5]. Для исследования их морфологии часто применяют методы зондовой микроскопии [6]. Ранее нами метод ионно-лучевой кристаллизации был использован для выращивания кремниевых слоев [7], квантово-размерных гетероструктур в системе Ge/Si [8] и InAs/GaAs [9]. Параллельно с решением технологических задач нами проводилось также моделирование зависимостей функциональных характеристик солнечных элементов на основе аморфного кремния [10] и квантово-размерных гетероструктур [11]. Цель предлагаемой работы заключается в проведении численного моделирования и оптимизации функциональных характеристик монокристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

Моделирование проводилось для спектрального состава солнечного излучения AM 1.5 в спектральном диапазоне от 300 до 1200 нм, освещение осуществлялось с фронтальной части. В качестве контактов были выбраны идеальные контакты Шоттки (работа выхода электронов принималось равной 4,05 эВ для фронтального и тыльного контактов). Скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок S_n и S_p на границе контактов Шоттки равнялась 10^7 см/с. В процессе моделирования варьировалась температура окружающей среды от 250 до 350 К; толщина фронтального слоя c-Si(n) от 300 до 500 нм, концентрация основных носителей заряда N_d от 10^{16} до 10^{19} см$^{-3}$. Толщина тыльного слоя p варьировалась в диапазоне от 10 до 500 мкм и концентрация носителей заряда N_a от 10^{16} до 10^{18} см$^{-3}$. Ширина запрещенной зоны составляла 1,124 эВ. Для c-Si(n) были использованы следующие параметры:

подвижность электронов μ_n = 119,5 см²/В·с, подвижность дырок μ_p = 159,9 см²/В·с, а для тыльного слоя c-Si(p) подвижность электронов μ_n = 1041 см²/В·с и подвижность дырок μ_p = 412,9 см²/В·с. Длины свободного пробега для всех слоев L_n = 0,246 мкм и L_p = 0,398 мкм.

Моделирование проводилось на основе стандартной «диффузионно-дрейфовой» одномерной модели. В этой модели совместно решается система одномерных уравнений с использованием дискретной сетки. Система представлена уравнением Пуассона и двумя уравнениями переноса заряда в случае электронов и дырок.

$$\begin{cases} -q\dfrac{\partial n}{\partial t} + divJ_n = qR; \\ -q\dfrac{\partial p}{\partial t} + divJ_p = -qR; \\ divD = q\left(p - n + N_d^+ - N_a^-\right); \\ J_n = q\mu_n nE + qD_n\nabla n; \\ J_p = q\mu_p pE + qD_p\nabla p; \\ D = \varepsilon E = -\varepsilon\nabla\varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где q – заряд электрона; E – напряженность электрического поля; D_n – диффузионный коэффициент для электрона; D_p – диффузионный коэффициент для дырки; ε – диэлектрическая проницаемость. $\varphi = \varphi(x, t)$, $n = n(x, t)$ и $p = p(x, t)$, которые должны быть решены в ограниченной области $\Omega \subset R^q$, q = 1, 2, 3. Моделирование проводилось в свободно распространяемой программе AFORS–HET 2.5.

Уравнение вольтамперной характеристики имеет вид

$$I = I_{ph} - I_0\left[\exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1\right], \quad (2)$$

где I_{ph} – плотность фототока; I_0 – плотность тока насыщения; A – диодный коэффициент; T – температура; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; U – напряжение.

Ток короткого замыкания численно равен фототоку:

$$I_{кз} = I_{ph}. \quad (3)$$

Напряжение холостого хода находится через величину фототока:

$$U_{хх} = \frac{A \cdot k \cdot T}{e}\ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0}\right). \quad (4)$$

Важнейшей характеристикой солнечных элементов является КПД. КПД определяет эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию:

$$\eta = \frac{P_M}{P} = \frac{ff \cdot I_{кз} \cdot U_{хх}}{P}, \quad (5)$$

где P – мощность падающего на СЭ солнечного излучения, приходящаяся на единицу поверхности СЭ; P_M – максимальная выходная мощность СЭ, отнесенная к площади поверхности; ff – коэффициент (фактор) заполнения или коэффициент формы ВАХ. Фактор заполнения показывает, какая часть мощности, вырабатываемая СЭ, используется в нагрузке и определяется как [6]

$$ff = \frac{I_М \cdot U_М}{I_{кз} \cdot U_{хх}}, \quad (6)$$

где $I_М$ и $U_М$ – плотность тока и напряжения, соответствующая наибольшей мощности $P_М$.

Результаты численного моделирования влияния уровня легирования доноров N_d в фронтальном слое c-Si(n) при неизменной толщине d = 300 нм на вольтамперную характеристику приведены на рис. 1.

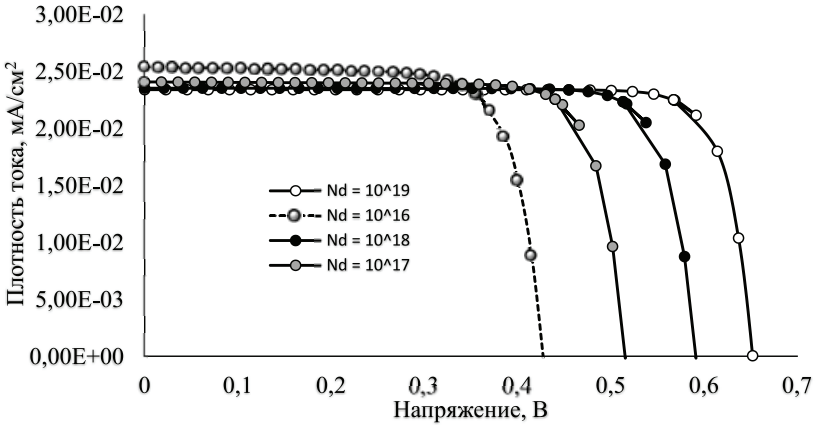

Рис. 1. Зависимость ВАХ моделируемого солнечного элемента от уровня легирования фронтального слоя

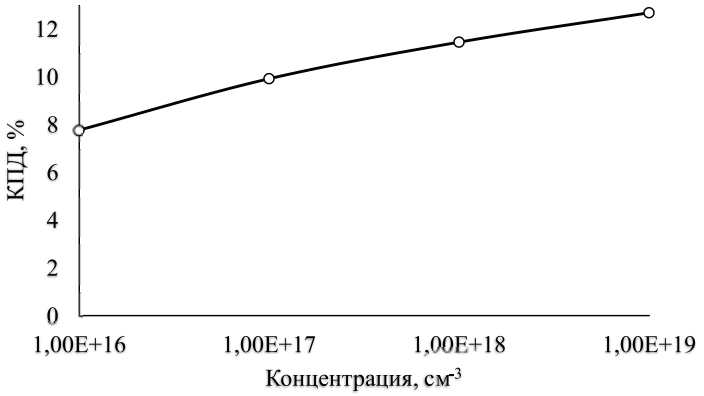

Рис. 2. Зависимость КПД моделируемого солнечного элемента от уровня легирования фронтального слоя c-Si(n)

Оптимальное значение уровня легирования фронтального слоя c-Si(n) можно определить из рис. 2.

Анализ полученных графических и численных данных показывает, что увеличение уровня легирования фронтального слоя с 10^{16} до 10^{19} см$^{-3}$ приводит к небольшому спаду тока короткого замыкания $I_{кз}$ и увеличению КПД. Зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от уровня легирования фронтального слоя носит значительный характер. Так, при изменении уровня легирования фронтального слоя в указанном диапазоне напряжение холостого хода уменьшилось на 0,23 В.

Установлено, что изменение уровня легирования N_d оказывает большее влияние на напряжение холостого хода U_{xx}, чем на ток короткого замыкания $I_{кз}$. В диапазоне концентрации 10^{16}–10^{19} см$^{-3}$ повышается U_{xx} 0,43 до 0,65 В и снижается $I_{кз}$ с 25,4 до 23,37 мА/см^2. Установленные закономерности объясняются логарифмической зависимостью U_{xx} и обратно пропорциональной зависимостью $I_{кз}$ от собственной концентрации доноров N_d. В совокупности повышение N_d приводит к возрастанию КПД с 8,2 до 12,7 %.

Результаты моделирования влияния уровня легирования акцепторов N_a в тыльном слое c-Si(p) при неизменной толщине d = 300 мкм на эффективность солнечного преобразователя показаны на рисунке 3.

Анализ полученных графических и численных данных показывает, что увеличение уровня легирования тыльного слоя с 10^{16} до 10^{18} см$^{-3}$ приводит к незначительному увеличению тока короткого замыкания $I_{кз}$. КПД немного увеличивается, с 11 до 12,6 %. Можно видеть, что зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от уровня легирования тыльного слоя носит слабый характер и уменьшается на 50 мВ. Установлено, что изменение уровня легирования акцепторов N_a оказывает небольшое увеличение напряжения холостого хода U_{xx} и тока короткого замыкания $I_{кз}$. В диапазоне концентрации 10^{16}–10^{18} см$^{-3}$ повышается U_{xx} 0,6 до 0,65 В и снижается $I_{кз}$ с 22,2 до 23 мА/см^2.

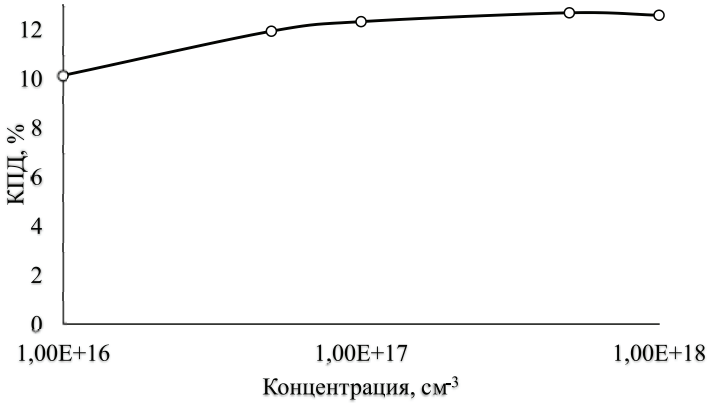

Рис. 3. Зависимость КПД моделируемого солнечного элемента от уровня легирования тыльного слоя c-Si(p)

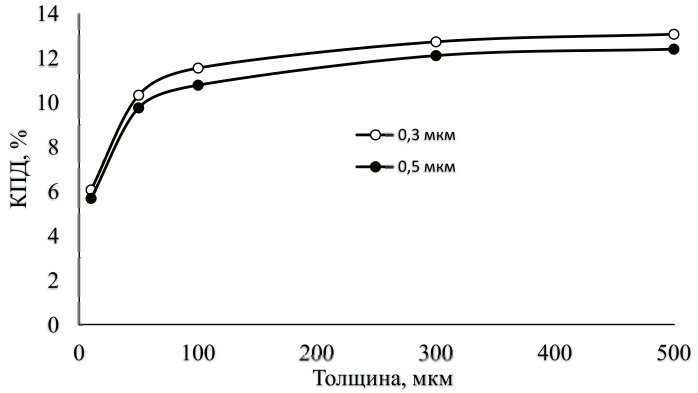

Рис. 4. Зависимость КПД моделируемого солнечного элемента от толщины тыльного слоя c-Si(p) при разной толщине фронтального слоя c-Si(n)

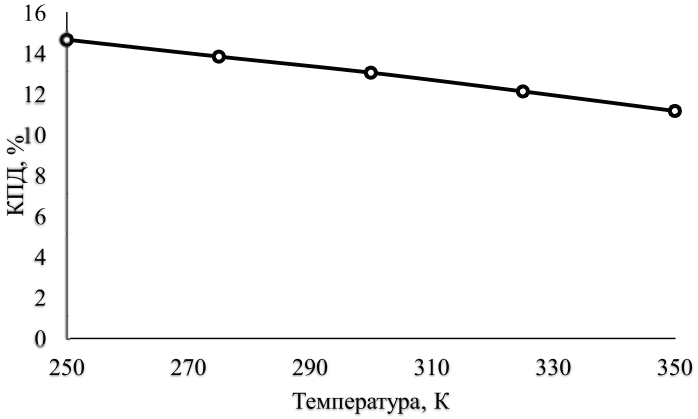

Рис. 5. Зависимость КПД моделируемого солнечного элемента от температуры окружающей среды

Результаты численного моделирования влияния толщины d тыльного слоя c-Si(p) на КПД представлены на рис. 4.

Технологически оправдано выращивать фронтальные слои толщиной d от 100 до 300 нм. При больших значениях толщины КПД моделируемого солнечного элемента становится менее 13 %. Слои тоньше 100 нм достаточно сложно получить. Поэтому оптимальной толщиной фронтального слоя будем считать 300 нм. При толщине тыльного слоя, равной 500 мкм, достигается максимальный КПД исследуемого солнечного элемента.

На рис. 5 графически представлена зависимость изменения температуры окружающей среды на КПД исследуемого солнечного элемента со следующими характеристиками: $N_d = 10^{19}$ см$^{-3}$, $N_a = 5\cdot10^{17}$ см$^{-3}$, толщина фронтального слоя c-Si(n) равна $d = 300$ нм и толщина тыльного слоя c-Si(p) равна $d = 300$ мкм.

Выводы

Таким образом, в программе AFORS–HET 2.5 на основе диффузионно-дрейфовой модели Шокли – Рида – Холла было проведено численное моделирование влияния толщины d, температуры T и уровня легирования N_d фронтального и N_a тыльного слоя на функциональные характеристики кремниевых солнечных элементов c–Si(n)/c–Si(p). Получены и проанализированы зависимости вольтамперных характеристик от параметров фронтального и тыльного слоя d, T, N_a и N_d. Установлено, что при толщине фронтального слоя $d = 300$ нм и толщине тыльного слоя $d = 500$ мкм КПД моделируемого солнечного элемента достигает максимального значения, равного 14 % при концентрации доноров $N_d = 10^{19}$ см$^{-3}$ и концентрации акцепторов $N_a = 5\cdot10^{17}$ см$^{-3}$ при температуре окружающей среды $T = 250$ K. Следует отметить, что КПД реальных солнечных элементов может быть меньше расчетных на 3–5 % [10], так как что на экспериментальных моделях появляются некоторые погрешности, которые не описываются формулами в аналитической модели. Поэтому на практике следует ожидать КПД у реальных солнечных элементов порядка 12–13 %.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-5115.2016.8.

Список литературы

1. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – № 8. – С. 937–948.

2. Андреев В.М., Сорокина С.В., Тимошина Н.Х., Хвостиков В.П., Шварц М.З. Солнечные элементы на основе антимонида галлия // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – № 5. – С. 695–699.

3. Андреев В.М. Гетероструктурные солнечные элементы // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – № 9. – С. 1035–1038.

4. Лантратов В.М., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А., Тимошина Н.Х., Шварц М.З., Андреев В.М. Высокоэффективные двухпереходные gainp/gaas солнечные элементы, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – № 6. – С. 751–755.

5. Лозовский В.Н., Чеботарев С.Н., Ирха В.А., Валов Г.В. Получение и использование позиционных меток в сканирующей зондовой микроскопии // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – № 16. – С. 1–5.

6. Лунин Л.С., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Болобанова Л.Н. Ионно-лучевое осаждение фотоактивных нанослоев кремниевых солнечных элементов // Неорганические материалы. – 2012. – Т. 48. – № 5. – С. 517–522.

7. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А. Особенности формирования многослойных наноструктур Ge/Si при ионно-лучевой кристаллизации // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – № 16. – С. 30–37.

8. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Williamson A., Лунин Л.С., Ирха В.А., Гамидов В.А. Ионно-лучевая кристаллизация наноструктур InAs/GaAs(001) // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. – № 13. – С. 102–110.

9. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А. Моделирование кремниевых тонкопленочных трехкаскадных солнечных элементов α-SI:H/μC-SI:O/μC-SI:H // Вестник Южного научного центра РАН. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 18–25.

10. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Ирха В.А., Дудников С.А. Моделирование вольтамперных и спектральных характеристик солнечных элементов InAs-QD/GaAs // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 10 (132). – С. 28–32.

References

1. Alfjorov Zh.I., Andreev V.M., Rumjancev V.D. Tendencii i perspektivy razvitija solnechnoj fotojenergetiki // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2004. T. 38. no. 8. pp. 937–948.

2. Andreev V.M., Sorokina S.V., Timoshina N.H., Hvostikov V.P., Shvarc M.Z. Solnechnye jelementy na osnove antimonida gallija // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2009. T. 43. no. 5. pp. 695–699.

3. Andreev V.M. Geterostrukturnye solnechnye jelementy // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 1999. T. 33. no. 9. pp. 1035–1038.

4. Lantratov V.M., Kaljuzhnyj N.A., Mintairov S.A., Timoshina N.H., Shvarc M.Z., Andreev V.M. Vysokojeffektivnye dvuhperehodnye gainp/gaas solnechnye jelementy, poluchennye metodom MOS-gidridnoj jepitaksii // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2007. T. 41. no. 6. pp. 751–755.

5. Lozovskij V.N., Chebotarev S.N., Irha V.A., Valov G.V. Poluchenie i ispolzovanie pozicionnyh metok v skanirujushhej zondovoj mikroskopii // Pisma v Zhurnal tehnicheskoj fiziki. 2010. T. 36. no. 16. pp. 1–5.

6. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashhenko A.S., Bolobanova L.N. Ionno-luchevoe osazhdenie fotoaktivnyh nanosloev kremnievyh solnechnyh jelementov // Neorganicheskie materialy. 2012. T. 48. no. 5. pp. 517–522.

7. Chebotarev S.N., Pashhenko A.S., Lunin L.S., Irha V.A. Osobennosti formirovanija mnogoslojnyh nanostruktur Ge/Si pri ionno-luchevoj kristallizacii // Pisma v Zhurnal tehnicheskoj fiziki. 2013. T. 39. no. 16. pp. 30–37.

8. Chebotarev S.N., Pashhenko A.S., Williamson A., Lunin L.S., Irha V.A., Gamidov V.A. Ionno-luchevaja kristallizacija nanostruktur InAs/GaAs(001) // Pisma v Zhurnal tehnicheskoj fiziki. 2015. T. 41. no. 13. pp. 102–110.

9. Chebotarev S.N., Pashhenko A.S., Lunin L.S., Irha V.A. Modelirovanie kremnievyh tonkoplenochnyh trehkaskadnyh solnechnyh jelementov α-SI:H/μC-SI:O/μC-SI:H // Vestnik Juzhnogo nauchnogo centra RAN. 2013. T. 9. no. 4. pp. 18–25.

10. Chebotarev S.N., Pashhenko A.S., Irha V.A., Dudnikov S.A. Modelirovanie voltampernyh i spektralnyh harakteristik solnechnyh jelementov InAs-QD/GaAs // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Alternativnaja jenergetika i jekologija. 2013. no. 10 (132). pp. 28–32.