

Численное моделирование пропускания солнечного излучения в кремниевых фотовольтаических элементах с текстурированной поверхностью

Р.З. Хафизов¹, А.Е. Тимофеев²

¹ООО «ГрафИмпресс», imagelab@mail.ru

²МИЭТ, alex_93_ti@mail.ru

Аннотация — Выполнено численное моделирование пирамидально текстурированных монокристаллических кремниевых солнечных элементов с однослойным (SiO_2) и двухслойным ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$) просветляющими покрытиями. Результаты моделирования использованы для анализа эффективности преобразования излучения с учетом оптического пропускания поверхности солнечного элемента. Моделирование проводилось с использованием САПР SYNOPSIS TCAD. Рассмотрены возможности оптимизации геометрических параметров текстуры и просветляющих покрытий.

Ключевые слова — монокристаллический кремний, солнечный элемент, просветляющее покрытие, анизотропное травление, текстура, солнечное излучение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Высокая эффективность преобразования солнечной энергии в солнечных элементах достигается за счет применения ряда технологических и конструктивных усовершенствований [1]. Один из основных факторов увеличения эффективности состоит в создании условий для максимального пропускания солнечного света поверхностью элемента. Известным способом улучшения характеристик поглощения света в солнечных элементах на основе монокристаллического кремния является формирование на его поверхности тонких диэлектрических просветляющих покрытий [2]. Дальнейшее улучшение характеристик поглощения света солнечным элементом может быть достигнуто путем анизотропного травления поверхности кремния, в результате которого формируется текстура в виде перевернутых пирамид [3]. Этот вид текстурирования в сочетании с оптимизированным просветляющим покрытием поверхности солнечных элементов обеспечивает значительное увеличение оптического поглощения.

Для прогнозирования оптимальных параметров такой комбинированной структуры может быть эффективно применено численное моделирование [4]. В настоящей работе для этой цели был использован пакет программного обеспечения TCAD компании SYNOPSIS. Процесс моделирования осуществлялся с целью определения параметров просветляющих диэлектрических покрытий (SiO_2 , $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$) и

пирамидального текстурирования, обеспечивающих максимальное пропускание электромагнитного излучения солнечного спектра (от 350 до 1100 нм) модифицированной поверхностью кремния. Работа выполнялась в ходе проектирования солнечного элемента, удовлетворяющего заданию по достижению КПД выше 20%. Моделирование проводилось с учетом технологических ограничений и возможностей оборудования НПК «Технологический центр».

II. ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 пунктирной линией выделена двумерная структура одной ячейки перевернутой пирамиды, которая была использована для моделирования.

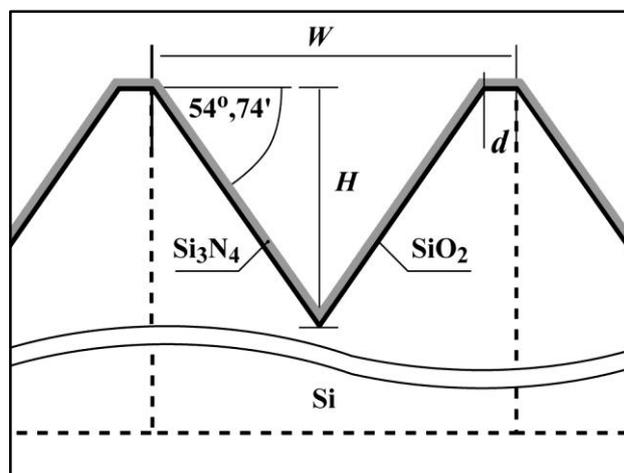


Рис. 1. Двумерная структура ячейки солнечного элемента со структурированной поверхностью в виде перевернутой пирамиды

При моделировании оптических характеристик солнечных элементов учитывались оптические параметры материалов. Так как основная часть солнечного излучения поглощается на глубине 250-300 мкм, интенсивность излучения на всех границах ячейки, кроме верхней, полагалась равной нулю. Световой поток представлял дискретный набор параллельно идущих лучей, тем самым учитывалось влияние геометрии ячейки. Для каждой длины волны рассчитывался коэффициент пропускания лицевой

поверхности. Расчёт интегрального коэффициента использования солнечной энергии проводился путём интегрирования по спектру излучения.

Основными геометрическими параметрами структуры являются: шаг пирамид W , ширина маскирующей сетки d , высота пирамид H и угол между основанием и гранью пирамид $\alpha = 54^\circ, 74$.

По своим оптическим свойствам одним из наиболее подходящих материалов для формирования пленок, уменьшающих отражение солнечного излучения поверхностью кремния, является Si_3N_4 . Однако важный фактор, который необходимо учитывать при создании высокоэффективных солнечных элементов, состоит в минимизации скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда на границе полупроводник-диэлектрик. Наилучшими пассивирующими свойствами по отношению к кремнию обладают пленки SiO_2 . В этой связи наиболее предпочтительной двухслойной просветляющей комбинацией слоев является структура $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$, где оксид кремния используется в качестве тонкого (~ 30 нм) подслоя, обеспечивающего низкую плотность рекомбинационных центров на поверхности кремниевого солнечного элемента. Важно также, что эти материалы являются стандартными в микроэлектронном производстве.

Поскольку для стандартизации солнечных элементов используется спектр AM 1.5G (1000 Вт/м^2), то при расчетах использовались спектральные зависимости показателей преломления применяемых материалов, представленные на рис. 2. Значение показателя преломления для нитрида кремния взято из источника [3], для кремния и SiO_2 соответствующие значения взяты из стандартной модели комплексного показателя преломления (Model of the complex refractive index).

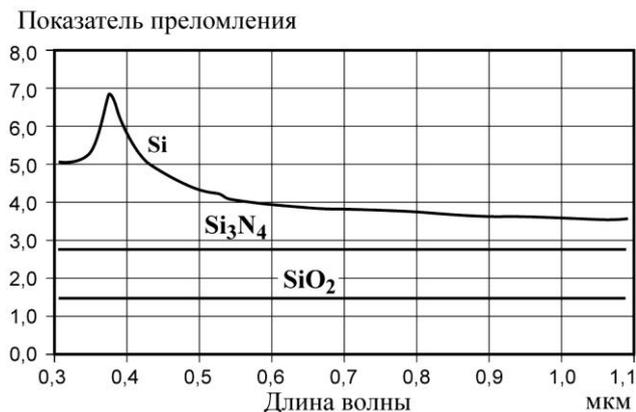


Рис. 2. Зависимость показателя преломления материалов от длины волны излучения

Луч света, проходящий через границу раздела двух прозрачных сред с разными показателями преломления, делится на отраженные и преломленные лучи. В отсутствие поглощения на границе раздела двух сред, выполняется условие $I = R + T$, где I , R и T – интенсивности падающего, отраженного и

преломленного лучей, соответственно. Для их вычислений использовался метод трассировки лучей (Raytracer Method).

Для оценки эффективности прохождения излучения через границу раздела двух сред в данной работе рассчитывалась спектральная зависимость коэффициента пропускания света, определяемого как:

$$k_T = 1 - R/I. \quad (1)$$

С учетом пропускания просветляющего покрытия интегральный коэффициент использования солнечной энергии рассчитывался по формуле:

$$\eta_k = \frac{\int_0^\infty F(\lambda_0) \kappa(\lambda_0) k_T(\lambda_0) d\lambda_0}{\int_0^\infty F(\lambda_0) \kappa(\lambda_0) d\lambda_0}, \quad (2)$$

где $F(\lambda_0)$ – спектральное распределение солнечной энергии AM 1.5, $\kappa(\lambda_0)$ – спектральная чувствительность кремния, $k_T(\lambda_0)$ – рассчитанное с учётом геометрии поверхности значение коэффициента пропускания.

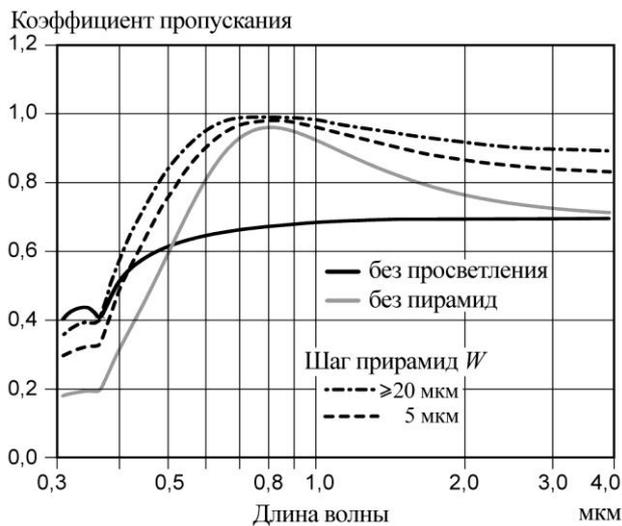
III. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 (а, б) представлены результаты моделирования спектральной зависимости пропускания солнечного излучения поверхностью солнечного элемента с различными ее модификациями.

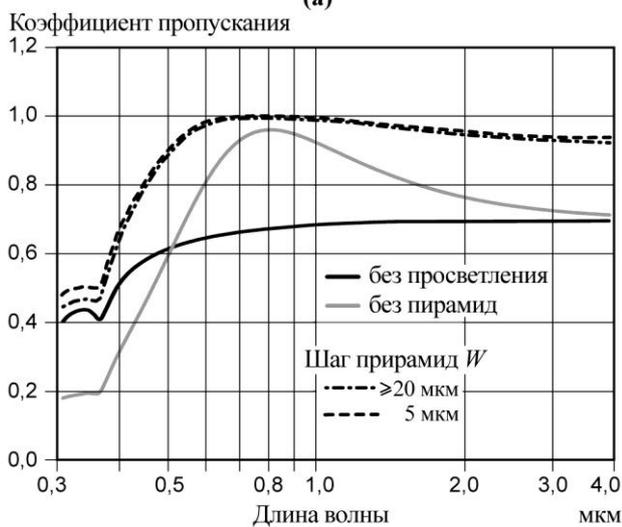
Как отмечалось, двойное просветляющее покрытие $\text{SiO}_2 + \text{S}_3\text{N}_4$ поверхности кремниевого солнечного элемента представляет основной интерес, поскольку SiO_2 обеспечивает лучшую пассивацию поверхности кремния, а Si_3N_4 позволяет оптимизировать оптическое пропускание излучения. Поэтому сначала моделировалась пирамидально текстурированная поверхность кремния с двухслойным просветляющим покрытием (30 нм $\text{SiO}_2 + 40$ нм Si_3N_4). Исследовалась спектральная зависимость коэффициента пропускания излучения для разных значений шага следования пирамид. Для сравнения на графике приведены кривые для нетекстурированной поверхности с просветлением и без него (рис. 3а). Ширина d маскирующей сетки, обеспечивающей формирование пирамид, полагалась равной 2 мкм, что связано с ограничением контактной фотолитографии. Из графика видно, что максимальное пропускание достигается при шаге пирамид более 20 мкм. Повышение точности фотолитографии позволяет уменьшить ширину маскирующей сетки. За счет этого максимальное оптическое пропускание может быть достигнуто при меньших значениях шага W пирамид. Об этом свидетельствуют результаты моделирования, в котором ширина d маскирующей сетки полагалась равной нулю (рис. 3б).

Рис. 4 иллюстрирует результаты моделирования спектральной зависимости пропускания солнечного излучения пирамидально текстурированной поверхностью ($W = 20$ мкм, $d = 2$ мкм) с двухслойным просветляющим покрытием из пассивирующего слоя SiO_2 толщиной 30 нм и слоя S_3N_4 различной толщины. Из графика видно, что с уменьшением толщины слоя

Si_3N_4 максимум пропускания излучения смещается в коротковолновую область спектра.



(а)



(б)

Рис. 3. Спектральная зависимость пропускания солнечного излучения поверхностью солнечного элемента, (а) пирамидально текстурированная поверхность с двухслойным просветляющим покрытием (30 нм SiO_2 + 40 нм Si_3N_4) при $W = 20$ мкм и $d = 2$ мкм, (б) для той же текстуры при $d = 0$

Были также рассмотрены возможности просветления с использованием однослойного покрытия из SiO_2 . Результаты моделирования для пирамидально текстурированной поверхности ($W = 20$ мкм, $d = 2$ мкм) с таким просветлением представлены на рис. 5. Видно, что с ростом толщины пленки SiO_2 максимум пропускания смещается в длинноволновую область спектра. Перелом кривых в коротковолновой области обусловлен спектральной зависимостью показателя преломления кремния (рис. 2).

Для определения оптимальных параметров двухслойного ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$) и однослойного (SiO_2) просветляющих покрытий рассчитывалась зависимость интегрального коэффициента

использования солнечной энергии от толщины нитрида кремния.

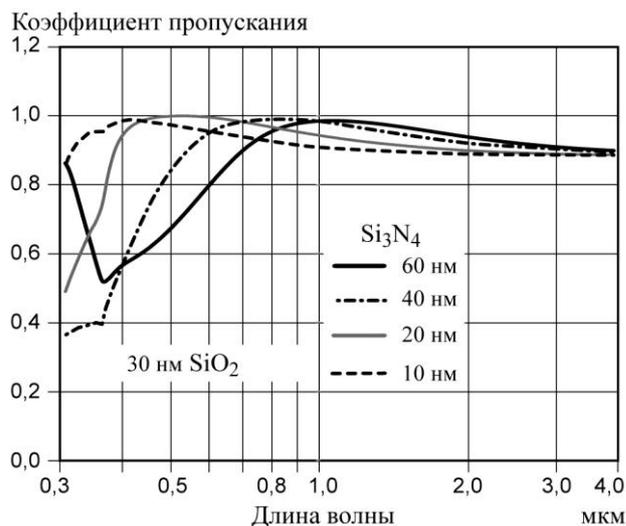


Рис. 4. Спектральная зависимость пропускания солнечного излучения пирамидально текстурированной поверхностью солнечного элемента с двухслойным просветляющим покрытием (30 нм SiO_2) для различных толщин нитрида кремния

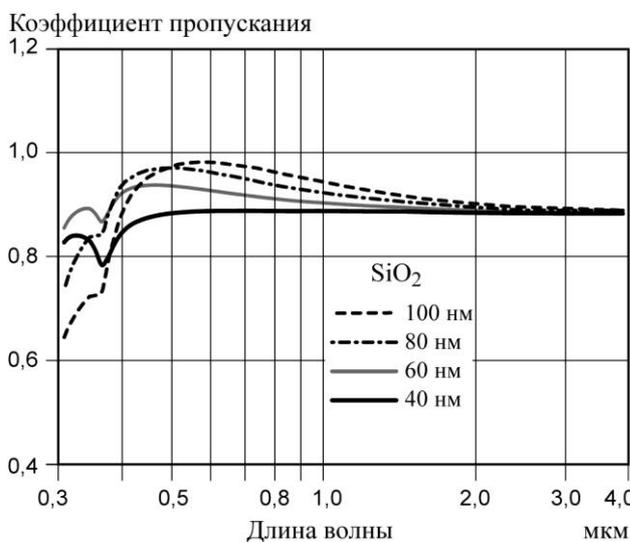


Рис. 5. Спектральная зависимость пропускания солнечного излучения пирамидально текстурированной поверхностью солнечного элемента с однослойным просветляющим покрытием для разных толщин SiO_2

Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7. Как видно из графика на рис. 6, потери эффективности, обусловленные отражением солнечного света, в пирамидально текстурированных подложках с двухслойным просветляющим диэлектрическим покрытием могут быть сокращены до 2-3%. Максимальная передача энергии для такой структуры достигается при общей толщине просветляющего покрытия равной 50 нм. Использование однослойного покрытия из SiO_2 дает чуть худшие результаты (рис. 7), но из-за упрощения технологии такой вариант также достоин внимания.

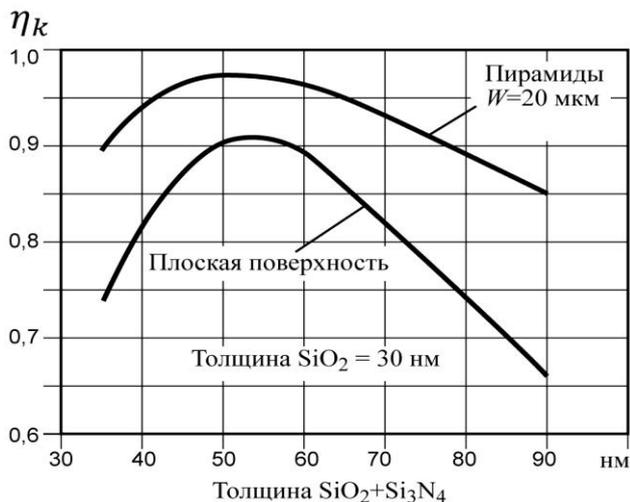


Рис. 6. Зависимость интегрального коэффициента использования солнечной энергии для солнечного элемента с пирамидально текстурированной поверхностью с двухслойным просветляющим покрытием от толщины слоя нитрида кремния

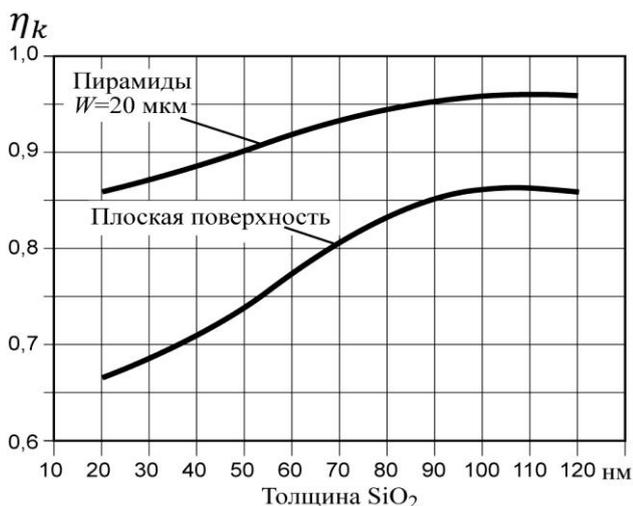


Рис. 7. Зависимость интегрального коэффициента использования солнечной энергии для солнечного элемента с пирамидально текстурированной поверхностью от толщины просветляющего слоя SiO₂

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное моделирование иллюстрирует возможности оптимизации параметров пирамидально структурированной поверхности солнечных элементов с просветляющими диэлектрическими слоями. Показано, что формирование структуры в виде перевернутых пирамид с соответствующим просветлением обеспечивает существенное (до 30% в коротковолновой области спектра) улучшение использования энергии солнечного излучения. Выявлены спектральные зависимости оптического пропускания для однослойного (SiO₂) и двухслойного (SiO₂ + Si₃N₄) просветления.

Максимум оптического пропускания в структурах с двойным слоем просветления (SiO₂ + Si₃N₄) смещается в сторону коротких длин волн с уменьшением толщины нитрида (рис. 4). Использование двухслойного диэлектрического покрытия обеспечивает более высокое просветление. Этот вариант предпочтителен также в силу того, что подслой SiO₂ минимизирует скорость поверхностной рекомбинации носителей, а Si₃N₄ характеризуется высоким сопротивлением к ионному дрейфу.

Следует отметить, что просветление является лишь одним из факторов, улучшающих эффективность солнечных элементов. При их проектировании необходимо учитывать также и другие потери преобразования энергии, связанные с рекомбинацией носителей (объемной и поверхностной) [5] и омическими потерями в токосъемных шинах. Следует обратить внимание и на то, что пирамидальное текстурирование подложки увеличивает скорость поверхностной рекомбинации из-за изменения ориентации ее поверхности на (111) [6] и увеличения площади поверхности примерно на 70%.

V. ВЫВОДЫ

Представлены результаты моделирования оптического пропускания однослойного (SiO₂) и двухслойного (SiO₂ + Si₃N₄) просветляющих покрытий на пирамидально текстурированной подложке монокристаллического кремния. Показано, что эффективность использования солнечной энергии может быть увеличена за счет оптимизации параметров просветления.

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ – уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0012.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. W. Glunz, High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells // *Advances in OptoElectronics*, vol. 2007, 2007, Article ID 97370, 15 pages.
- [2] F. Rubio, J. Denis, J. M. Albella and J. M. Martinez-Duart, Sputtered Ta₂O₅ antireflection coatings for silicon solar cells // *Thin Solid Films*, vol. 90, 1982, pp. 405–408.
- [3] J. Benick, B. Hoex, M. C. M. van de Sanden, W. M. M. Kessels, O. Schultz, S. W. Glunz, High efficiency n-type Si solar cells on Al₂O₃-passivated boron emitters // *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008, Article ID 253504, 3 pages.
- [4] William R. Taube, A. Kumar, Simulation and Optimization of n-type Perl Silicon Solar Cell Structure // *Journal of nano- and electronic physics*. vol. 3, 2011, pp. 1127–1136.
- [5] B. Fuks, Improvement of the efficiency of silicon solar cells // *Semiconductors*, vol. 48(12), 2014, pp. 1664–1673.
- [6] C. Reichel, F. Granek, J. Benick, O. Schultz-Wittmann, S. Glunz, Comparison of emitter saturation current densities determined by injection-dependent lifetime spectroscopy in high and low injection regimes // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 20, 2012, pp. 21–30.

Numerical simulation of solar radiation transmittance for textured surface silicon photovoltaic cells

R.Z. Khafizov¹, A. E. Timofeev²

¹GraphImpress Co Ltd, Moscow, Russia, imagelab@mail.ru

²Nation Research University of Electronic Technology «MIET», Moscow, Russia, alex_93_ti@mail.ru

Keywords — solar cell, antireflection coating (ARC), texture, transmittance, efficiency, optimization.

ABSTRACT

To achieve high solar energy conversion efficiency, design and technological parameters of the solar cells must satisfy many requirements [1]. One of the main requirements is high transmittance of sunlight by the surface of the cell. Thin dielectric antireflection coatings (ARC) [2] and structuring of the silicon surface in the form of inverted pyramids are used [3] for this purpose.

To predict the optimal parameters of such combined structures numerical modeling can be effectively applied [4]. This paper presents the simulation results of spectral dependence of solar radiation transmittance through the textured surface of silicon with single (SiO_2) and double layer ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$) dielectric antireflection coating. For modeling Synopsys TCAD software package was used.

The simulation results of the spectral dependence of solar radiation transmittance by solar cell with pyramidal textured surface and single (SiO_2) and double ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$) layer antireflection coating (ARC) are presented in this work.

The most preferred two-layer antireflection coating is $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ structure, where silicon oxide is used as a thin (~ 30 nm) sublayer, providing low density of recombination centers on the silicon solar cell surface, and Si_3N_4 is the most suitable material, which reduces reflection of solar radiation by the surface of the silicon. It is also important that these materials are standard in microelectronic manufacturing.

Simulation illustrates opportunities to increase energy conversion efficiency of solar cells. Transmittance of solar radiation increases with the increase of step distance of the pyramids up to values of 40 microns. The efficiency loss caused by reflection of sunlight in pyramidal textured substrates with double-layer antireflection dielectric coating can be reduced to 2-3%. The maximum energy transfer for such a structure is achieved when the total thickness of the coating is 50 nm. The use of single layer coatings (SiO_2) gives slightly worse results, but due to simpler technology, such variant is also worth attention.

It was shown that the formation of structure in the form of inverted pyramids with corresponding geometric parameters of antireflection coatings provides significant (up to 30% in the shortwave region of the solar spectrum) improving of the use of solar energy.

It should be noted that achieving high absorption of sunlight is only one part of creating high-efficiency solar cells. This problem must be solved taking into account other factors influencing the quality of solar cells, such as losses due to the recombination of photogenerated carriers in the bulk and on the surface [5] and resistivity losses in contact grids.

In particular, an important point that should be taken into account is that the pyramidal textured surface is characterized by increased rate of surface recombination due to the change in surface orientation from (100) to (111) and the increase of area of about 70% [6].

The work is done in Nation Research University of Electronic Technology (Russia, Moscow) with financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation – the unique identifier of the applied scientific researches is RFMEFI57814X00012.

REFERENCES

- [1] S. W. Glunz, High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells // *Advances in OptoElectronics*, vol. 2007, 2007, Article ID 97370, 15 pages.
- [2] F. Rubio, J. Denis, J. M. Albella and J. M. Martinez-Duart, Sputtered Ta_2O_5 antireflection coatings for silicon solar cells // *Thin Solid Films*, vol. 90, 1982, pp. 405–408.
- [3] J. Benick, B. Hoex, M. C. M. van de Sanden, W. M. M. Kessels, O. Schultz, S. W. Glunz, High efficiency n-type Si solar cells on Al_2O_3 -passivated boron emitters // *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008, Article ID 253504, 3 pages.
- [4] William R. Taube, A. Kumar, Simulation and Optimization of n-type Perl Silicon Solar Cell Structure // *Journal of nano- and electronic physics*. vol. 3, 2011, pp. 1127–1136.
- [5] B. Fuks, Improvement of the efficiency of silicon solar cells // *Semiconductors*, vol. 48(12), 2014, pp. 1664-1673.
- [6] C. Reichel, F. Granek, J. Benick, O. Schultz-Wittmann, S. Glunz, Comparison of emitter saturation current densities determined by injection-dependent lifetime spectroscopy in high and low injection regimes // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 20, 2012, pp. 21–30.