

UDC 621.383.51

ENHANCEMENT OF ABSORPTION CHARACTERISTICS OF MULTINANOLAYER PHOTOVOLTAIC CELLS BY USING CHIRPED DISTRIBUTED BRAGG REFLECTORS

H.V. Baghdasaryan¹, T.M. Knyazyan¹, T.T. Hovhannisyan¹, M. Marciniak²

¹ National Polytechnic University of Armenia

² National Institute of Telecommunications, Poland

An electromagnetic wavelength-scale analysis of optical characteristics of multilayer photovoltaic (PV) cells based on a Si *p-i-n* type absorber is performed. A broadband non-periodic (chirped) distributed Bragg reflector (DBR) located on the top of the PV structure is supported by a metallic layer (Cu) and SiO₂ substrate. The numerical analysis is performed by the method of single expression (MSE). MSE is a non-traditional method of boundary problem solution in classical electrodynamics, and a convenient tool for wavelength-scale analysis of any multilayer and modulated photonic structure. Absorbing, reflecting and transmitting characteristics of multilayer PV cells with chirped DBR mirrors are obtained via performed computer modelling by the MSE. The influence of the number, thicknesses and alternation of the layers of the chirped DBRs on the absorbing characteristics of multilayer PV cells is analysed to determine favourable configurations for enhancement of their absorption efficiency. The localization of the electric component of the optical field and the power flow distribution within the considered PV structures are obtained to confirm an enhancement of absorption efficiency in favourable configurations of multilayer PV cells. The results of the performed electromagnetic wavelength-scale analysis will have a scientific and practical importance for optimizing the operation of thin-film multilayer PV cells with broadband resonant reflectors on the subject of enhancement of their efficiency.

Keywords: photovoltaics, multilayer photovoltaic cell, chirped distributed Bragg reflector, electromagnetic modelling, method of single expression.

Introduction. Today's photovoltaics (PVs) technology is one of the most attractive, scalable and mature renewable energy source technology and has advanced considerably in recent years [1, 2].

PVs is based on photovoltaic effect due to which solar energy is converted directly into electrical energy by photovoltaic cells. Improving the conversion efficiency of a PV cell is a key goal of the research in the field and makes PV technologies cost-competitive with more traditional sources of energy.

Though today's PV technology is well developed and extensively exploited for household and industrial applications, however there is still a need in enhancement of

PVs efficiency over a wider spectral range, using a cheap material base and technology for low cost mass production of durable PV devices.

Nowadays PV cells are thin-film cells with absorbing layer thicknesses that are of the same order or smaller than the operating wavelength [3]. Thin films essentially reduce the amount of semiconductor material required for each PV cell compared to bulky PV cells and hence lower the cost of production [4].

For better light harvesting in PV cells, different multilayer structures are used. Generally they consist of an absorbing layer covered from the top and the bottom, correspondingly by transparent and reflecting metal electrodes. Some structures have an antireflection coating above the top transparent electrode to reduce reflection losses in the PV cell [5]. Antireflection coatings can improve the absorption efficiency when the thickness of an absorbing layer is much greater than the operating wavelength. When the thickness of the absorbing layer is comparable to or smaller than the operating wavelength, high-reflectivity dielectric mirrors are used to enhance the absorption over a narrow spectral and angular range. The dielectric mirrors are usually high reflectivity distributed Bragg reflectors (DBRs) [6, 7]. DBRs made as non-periodic dielectric stacks where thicknesses of bilayers are monotonously changed by some law: linear, quadratic, exponential or other, are called chirped DBRs. Absorption in thin-film PV cells using chirped DBR mirrors can be enhanced over a wider spectral range by providing higher efficiency in comparison with those using conventional reflectors [8].

The present paper is devoted to the wavelength-scale numerical analysis of optical characteristics of multilayer PV cells with broadband resonant reflectors (chirped DBRs on the top of the structure) by the method of single expression (MSE) [9-11]. Numerical modelling will permit to reveal optimal PV structures for efficient light absorption in the certain region of the structure.

The essence of the MSE is the presentation of a general solution of Helmholtz' equation for electric field component $\dot{E}_x(z)$ in the special form of a single expression:

$$\dot{E}_x(z) = U(z) \cdot \exp(-jS(z)) \quad (1)$$

instead of traditional presentation as a sum of counter-propagating waves. Here $U(z)$ and $S(z)$ are real quantities describing the resulting electric field amplitude and phase, respectively. Time dependence $\exp(j\omega t)$ is assumed but suppressed throughout the analysis. Solution in the form (1) prevails upon the traditional approach of counter-propagating waves and is more general because it is not relied on the superposition principle. This form of solution describes all possible distributions of electric field amplitude, corresponding to propagating or evanescent waves in a medium of positive or negative permittivity, respectively. No preliminary assumptions concerning the

Helmholtz's equation solutions in different media are needed in the MSE. This gives advantages in the investigation of wave interaction with any longitudinally non-uniform linear and intensity dependent non-linear media, what can be done with the same ease and exactness.

Numerical Analysis of Multinanolayer Photovoltaic Cells with Chirped DBRs. A broadband PV microresonant structure with broadband chirped DBRs, in the range of (350 ... 750) nm near the central wavelength of 550 nm of the sun's maximal radiation is analysed. In the present paper, a PV structure with broadband resonant chirped DBRs made of TiO₂ is considered aimed at revealing the optimal structure for the efficient absorption of incident light in the specific region of a PV structure, where generation of electron-hole pairs is favourable. The PV structure consists of Si *p-i-n* junction with a metallic mirror on the bottom and a chirped DBR on the top. The whole structure is located on the substrate made of SiO₂. The schematic representation of the structure is shown in Fig. 1.

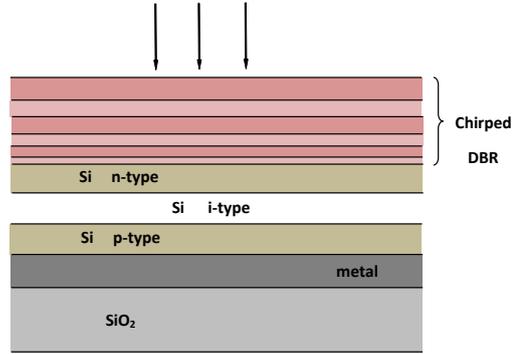


Fig. 1. Schematic representation of the PV structure with chirped DBR on the top

In the considered structure chirped DBRs made of TiO₂ are composed of 7 bi-layers of slightly different high $\epsilon_{H-TiO_2} = 7$ and low $\epsilon_{L-TiO_2} = 6.5$ permittivities. The thickness of the layer of low permittivity is kept constant and chosen to be $L_{L-TiO_2} = 53.9$ nm, while the thickness of the layer of high permittivity decreases gradually towards the illuminated side of the structure to provide a chirp law for DBR. The thicknesses of the layer of high permittivity are as follows: $L_{H1-TiO_2} = 135$ nm; $L_{H2-TiO_2} = 125$ nm; $L_{H3-TiO_2} = 114$ nm; $L_{H4-TiO_2} = 104$ nm; $L_{H5-TiO_2} = 93.5$ nm; $L_{H6-TiO_2} = 83.2$ nm; $L_{H7-TiO_2} = 72.8$ nm. The thickness of the substrate of permittivity $\epsilon_{SiO_2} = 2.1313$ is taken equal to $L_{SiO_2} = 848$ nm. The thickness of the metallic

layer (Cu) of permittivity $\tilde{\varepsilon}_m = \varepsilon'_m - i\varepsilon''_m = -6.432 - i3.5535$ at the central wavelength of $\lambda = 550 \text{ nm}$ is taken equal to $L_m = 608 \text{ nm}$. The p - i - n absorbing region made of Si has the following parameters: the p -type and the n -type layers of permittivity $\varepsilon_n = \varepsilon_p = 16$ have correspondingly thicknesses $L_p = 5500 \text{ nm}$ and $L_n = 4159 \text{ nm}$, the i -type layer of permittivity $\tilde{\varepsilon}_i = \varepsilon'_i - i\varepsilon''_i = 16.2 - i1.0$ has a thickness $L_i = 1365 \text{ nm}$.

The reflection spectrum of the PV structure with a chirped DBR has an oscillating character with maxima and minima at the specific wavelengths. At the reflectance minima high absorption of incident light in the PV structure takes place, while at the reflectance maxima modest absorption of incident light with the average absorptance of the structure of about 0.65 is observed. Since the transmittance of the structure reaches zero in the whole spectral range, the average reflectance at the wavelengths of maximal reflectance is correspondingly of about 0.35.

The permittivity profile of the PV structure with chirped DBR and the distributions of electric component of optical field and power flow density within the structure at the central wavelength $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ of the sun's maximal radiation (where high absorption of light energy is observed) are presented in Fig. 2.

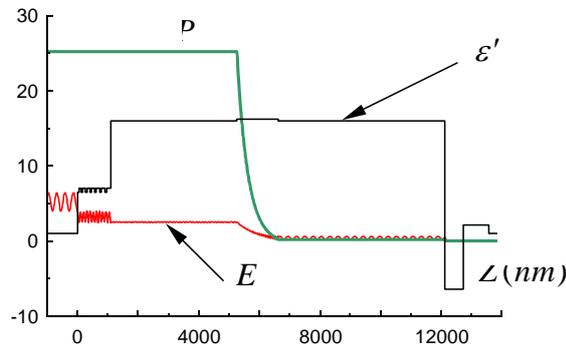


Fig. 2. Permittivity profile of the PV structure with DBR and distributions of the electric field amplitude \hat{E} and power flow density P within the structure at the wavelength $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$. The light incidence is from the left

As it is seen from Fig. 2, the electric field amplitude has an exponentially decaying character in the i absorbing layer of the p - i - n region and slightly oscillates in front of the structure according to insignificant reflection from the structure. A sharp decrease in the power flow density in the i absorbing layer is observed indicating

strong absorption of incident light that will contribute to the PV effect. Outside this region, the power flow density is constant except for the comparatively negligible decay within the metallic layer, indicating that essential absorption of incident energy takes place namely in the *i* absorbing layer of the structure.

Conclusion. Optimization of operation of thin-film multilayer PV cells with broadband resonant reflectors on the subject of enhancement of their efficiency has been carried out.

Electromagnetic wavelength-scale numerical analysis of optical characteristics of a multilayer PV structure based on a Si *p-i-n* type absorber with a chirped DBR on the top of the structure mounted on a metallic layer and SiO₂ substrate is performed by the MSE. The transmittance of the structure reaches zero in the whole spectral range of (350 ... 750) nm near the central wavelength of 550 nm of the sun's maximal radiation, while the reflectance and absorptance have their maxima and minima at some wavelengths. At the central wavelength of 550 nm, high absorption of light energy is observed. The influence of the layers of the chirped DBRs on the optical characteristics of multilayer PV cells is analysed by observing the localization of the electric component of the optical field and the power flow density distribution within the structures. Distributions of electric field amplitude and power flow density revealed that both of them have an exponentially decaying character in the *i* absorbing layer of the *p-i-n* region proving the fact of the strong absorption of the incident light that will contribute to the PV effect.

Acknowledgements. This work was supported by the RA MES State Committee of Science, in the frames of the research project № 15T-2J372.

References

1. **Singh G.K.** Solar power generation by PV (photovoltaic) technology // A review. Energy.- 2013. - Vol. 53. - P. 1-13.
2. Solar cell efficiency tables (Version 45) / **M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, et al** // Prog. Photovolt: Res. Appl. – 2015. - Vol. 23. - P. 1–9.
3. **Aberle A.G.** Thin-film solar cells // Thin Solid Films. - 2009. - Vol. 517. - P. 4706–4710.
4. Chirped porous silicon reflectors for thin-film epitaxial silicon solar cells / **I.J. Kuzma-Filipek, et al** // Journ. Applied Physiscs. - 2008. - Vol. 104. - P. 073529-1 - 073529-8.
5. **Selj J.K., Young D., Grover S.** Optimization of the antireflection coating of thin epitaxial crystalline silicon solar cells // Energy Procedia. - 2015. - Vol. 77. - P. 248 – 252.
6. **Babic D.I. and Corzine S.W.** Analytic expressions for the reflection delay, penetration depth, and absorptance of quarter-wave dielectric mirrors // IEEE J. Quantum Elect. – 1992. - Vol. 28. - P. 514–524.
7. Absorption loss influence on optical characteristics of multilayer distributed Bragg reflector: wavelength-scale analysis by the method of single expression / **H.V. Baghdasaryan,**

T.M. Knyazyan, T.H. Baghdasaryan, et al // Opto–Electron. Rev. - 2010. - Vol. 18, No. 4. - P. 438-445.

8. **Zheng J., Barton R.A., Englund D.** Broadband coherent absorption in chirped-planar-dielectric cavities for 2D-material-based photovoltaics and photodetectors // ACS Photonics. - 25 Aug. 2014. - DOI: 10.1021/ph500107b. - P. 1-20.
9. **Baghdasaryan H.V.** Method of backward calculation, in Photonic Devices for Telecommunications: how to model and measure / G. Guekos Ed. - Springer-Verlag, 1999.
10. **Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M.** Problem of plane EM wave self-action in multi-layer structure: An exact solution // Optical and Quantum Electronics. - 1999. - Vol. 31. - P. 1059-1072.
11. **Baghdasaryan H.V.** Basics of the Method of Single Expression: New Approach for Solving Boundary Problems in Classical Electrodynamics .- Yerevan: Chartaraget, 2013. - 164p.

Received on 01.02.2017.

Accepted for publication on 12.05.2017.

ԲԱԶՄԱՆԱՆՈՇԵՐՏ ՖՈՏՈԳԱԼՎԱՆԱԿԱՆ ՏԱՐՐԵՐԻ ԿԼԱՆՈՂ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԲԱՐԵԼԱՎՈՒՄԸ ՉԻՐՊԱՅԻՆ ԲԱՇԽՎԱԾ ԲՐԵԳՅԱՆ ԱՆԴՐԱԴԱՐՁԻՉՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՄԲ

Հ.Վ. Բաղդասարյան, Թ.Մ. Կնյազյան, Թ.Թ. Հովհաննիսյան, Մ. Մարցինիակ

Կատարված է Si *p-i-n* տիպի կլանիչի հիման վրա բազմանանոշերտ ֆոտոգալվանական (ՖԳ) տարրերի օպտիկական բնութագրերի էլեկտրամագնիսական ալիքի երկարության՝ մասշտաբում հետազոտումը: ՖԳ կառուցվածքի վերևի մասում տեղակայված լայնաշերտ ոչ պարբերական (չիրպային) բաշխված բրեգյան անդրադարձիչը (ԲԲԱ) հիմնված է Cu մետաղական շերտի և SiO₂ հարթակի վրա: Թվային հետազոտումը կատարված է միասնական արտահայտության մեթոդով (ՄԱՄ-ով): ՄԱՄ-ը ավանդական էլեկտրադինամիկայի սահմանային խնդիրների լուծման ոչ ավանդական եղանակ է և հարմար գործիք՝ ցանկացած բազմաշերտ ու մոդուլացված օպտիկական կառուցվածքների ալիքի երկարության՝ մասշտաբում հետազոտման համար: ՄԱՄ-ով կատարված համակարգչային մոդելավորման միջոցով ստացված են չիրպային ԲԲԱ հայելիներով բազմանանոշերտ ՖԳ տարրերի կլանող, անդրադարձնող և թողարկող բնութագրերը: Հետազոտված է չիրպային ԲԲԱ-ների շերտերի թվի, հաստությունների և հաջորդականության ազդեցությունը բազմանանոշերտ ՖԳ տարրերի կլանող բնութագրերի վրա՝ որոշելու համար դրանց կլանման արդյունավետությունը բարձրացնող շահավետ կառուցվածքները: Օպտիկական դաշտի էլեկտրական բաղադրիչի տեղակայումը և հզորության հոսքի բաշխվածությունը՝ դիտարկված ՖԳ կառուցվածքներում հաստատում է բազմանանոշերտ ՖԳ տարրերի շահավետ կառուցվածքներում կլանման արդյունավետության բարձրացումը: Էլեկտրամագնիսական ալիքի երկարության մասշտաբում կատարված հետազոտման արդյունքները գիտական և կիրառական նշանակություն կունենան լայնաշերտ ռեզոնատորային անդրադարձիչներով նուրբ թաղանթային

բազմանանոշերտ ՖԳ տարրերի աշխատանքի բարելավման համար՝ դրանց արդյունավետության բարձրացման դեպքում:

Առանցքային բաներ. ֆոտոգալվանություն, բազմանանոշերտ ֆոտոգալվանական տարր, չիրպային բաշխված բրեգման անդրադարձիչ, էլեկտրամագնիսական մոդելավորում, միասնական արտահայտության մեթոդ:

УЛУЧШЕНИЕ ПОГЛОЩАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОНАСЛОЙНЫХ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИРПОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

О.В. Багдасарян, Т.М. Князян, Т.Т. Оганесян, М. Марциниак

Проведен электромагнитный в масштабе длины волны анализ оптических характеристик многослойных фотовольтаических (ФВ) элементов на основе Si *p-i-n* типа поглотителя. Широкополосный неперриодический (чирпованный) распределенный брэгговский отражатель (РБО), расположенный на вершине ФВ структуры, основан на металлическом слое из Cu и подложке из SiO₂. Численный анализ проведен методом единого выражения (МЕВ). МЕВ является нетрадиционным методом для решения граничных задач в классической электродинамике и удобным инструментом для анализа в масштабе длины волны произвольных многослойных и модулированных оптических структур. Поглощательные, отражательные и пропускательные характеристики многослойных ФВ элементов с чирпованными РБО зеркалами получены посредством компьютерного моделирования с помощью МЕВ. Исследовано влияние числа, толщин и чередования слоев чирпованных РБО на поглощательные характеристики многослойных ФВ элементов для выявления благоприятных конфигураций с целью увеличения их поглощающей эффективности. Локализация электрической компоненты оптического поля и распределение потока энергии в рассматриваемой ФВ структуре подтверждают увеличение поглощающей эффективности в выигрышной конфигурации многослойного элемента. Результаты выполненного в масштабе длины волны электромагнитного анализа будут иметь научное и практическое значение для улучшения работы тонкопленочных многослойных ФВ элементов с широкополосными резонаторными отражателями на предмет увеличения их эффективности.

Ключевые слова: фотогальваника, многослойный фотогальванический элемент, чирпованный брэгговский отражатель, электромагнитное моделирование, метод единого выражения.