

ალფა ნაწილაკებით დასხივების გავლენა p-ტიპის Si+2ატ.%Ge შენადნობის ფუძეშრის p-n სტრუქტურის ელექტრულ მახასიათებლებზე

ია ყურაშვილი, ეკატერინე სანაია, ნინო ქიტოშვილი, ავთანდილ სიჭინავა, გიორგი დარსაველიძე

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო

აბსტრაქტი. შესწავლილია p-ტიპის ელექტროგამტარობის მონოკრისტალური Si+2ატ.%Ge შენადნობის (111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის ფუძეშრეზე ფორმირებული p-n სტრუქტურის ელექტროფიზიკური და ვოლტ-ამპერული თვისებები სხვადასხვა ფლუენსის ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობაში. საწყის და ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობებში გამოკვლეულია ექსპერიმენტული p-n სტრუქტურის ელექტრული მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი. ნაჩვენებია, მოკლე ჩართვის დენისა და ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობის მნიშვნელოვანი, ხოლო შევსების ფაქტორისა და უქმე სვლის ძაბვის სუსტი ვარდნა ალფა ნაწილაკების დასხივების ფლუენსის ამაღლების პირობებში.

გაანალიზებულია ალფა რადიაციის გავლენით p-n სტრუქტურის ელექტრული მახასიათებლების დეგრადაციის მექანიზმები. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ მოკლე ჩართვის დენისა და ფოტოელექტრული გარდაქმნის ეფექტურობის მნიშვნელოვანი ვარდნა განპირობებულია დენის არაძირითადი მატარებლების სიცოცხლის ხანგრძლივობის შესაძლებელი შემცირებით. გაანალიზებულია გერმანიუმის ატომებთან ლოკალიზებული დეფორმაციის, დისლოკაციების გარემომცველი მინარევი-რადიაციული დეფექტის ატმოსფეროს სივრცული განაწილების, ელექტრული აქტიურობისა და მდგრადობის წვლილი Si+2ატ.%Ge შენადნობის ფუძეშრეზე შექმნილი p-n სტრუქტურის ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ფორმირებაში.

საკვანძო სიტყვები: სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობი, p-n სტრუქტურა, ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი, მოკლე ჩართვის დენი, ეფექტურობა, შევსების ფაქტორი.

შესავალი

მონო- და მულტიკრისტალური სილიციუმი წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად მასალას სხვადასხვა დანიშნულების ფოტოელექტრულ გარდამქმნელების წარმოებაში. უკანასკნელ პერიოდში მკაფიოდ გამოიკვეთა სილიციუმის მზის ელემენტების ფუძემდებების სისქის შემცირების ტენდენცია. სილიციუმის მოცულობითი კრისტალების თხელი ფუძემდებების დამზადების პროცესებში ხშირია მსხვრევის შემთხვევები, რაც აუარესებს მზის ელემენტების წარმოების ეფექტურობას [1]. თხელი ფირების რღვევის სიმტკიცის გაუმჯობესების ერთ-ერთ საშუალებას წარმოადგენს სილიციუმის დოპირება იზოვალენტური გერმანიუმით [2]. სილიციუმის გერმანიუმით დოპირება ახშობს B-O დეფექტების ფორმირებას [3]. აღნიშნული დეფექტები აუარესებენ p-n სტრუქტურის სინათლის ენერგიის გარდაქმნის ეფექტურობას. გერმანიუმით დოპირებული სილიციუმის ნამზადების მექანიკური სიმტკიცის ამაღლების შესაძლებელ მექანიზმად განიხილავენ დისლოკაციების ძვრადობის შემცირებას. გერმანიუმის ატომების მეზობელ კოორდინაციაში არსებულ ჟანგბადის ატომებს და მათ შემცველ მცირე ზომების პრეციპიტატებს შეუძლიათ ეფექტურად დაამუხრუჭონ დისლოკაციები [4].

განსაზღვრული სტრუქტურული მდგომარეობისა და ელექტროფიზიკური და მექანიკური თვისებების სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მოცულობითი კრისტალების მიღება და მათ საფუძველზე სხვადასხვა დანიშნულების p-n სტრუქტურების შექმნა წარმოადგენს ნახევარგამტარული ხელსაწყოების ტექნოლოგიისა და კვლევის ერთ-ერთ პრიორიტეტულ ამოცანას.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობების ფუძემდებებსა და p-n სტრუქტურებში სხვადასხვა ფაქტორით (დამზადების პროცესი, თერმული, მექანიკური და რადიაციული ზემოქმედება) განპირობებული დეფექტების წარმოქმნის პირობების, ურთიერთქმედებისა და ფიზიკური თვისებების მოდიფიცირების მექანიზმების კვლევას მართვადი მახასიათებლების ნახევარგამტარული p-n სტრუქტურებისა და ხელსაწყოების შესაქმნელად.

ნაშრომში შესწავლილია ჩოხრალსკის მეთოდით EQ-SKJ-50HZ სისტემის სადნობ ლუმელში [111] კრისტალოგრაფიული მიმართულებით გაზრდილი მონოკრისტალური p-ტიპის Si+2ატ.%Ge შენადნობის საფუძველზე შექმნილი p-n სტრუქტურის ელექტროფიზიკური თვისებების კვლევა საწყის და ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობებში.

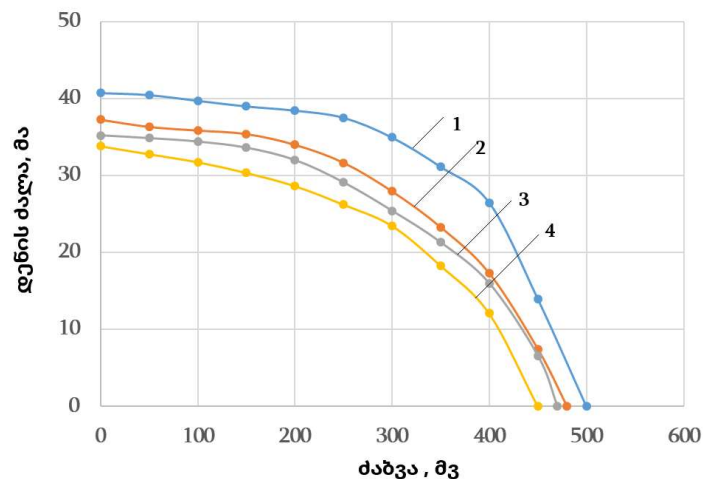
კვლევის მეთოდика

საკვლევი სტრუქტურების (111) ორიენტაციის ფუძემდებები დამზადებულია SiGe შენადნობის მოცულობითი კრისტალის (სიგრძე -60მმ, დიამეტრი -30მმ) შიდა ჭრის ალმასის დისკზე დაჭრის, ხეხვისა და პოლირების მეთოდებით. ერთსაფეხურიანი p-n სტრუქტურების ფორმირება 0,5-0,6 მმ სიღრმეზე განხორციელდა 1100°C ტემპერატურაზე 20 წთ-ს განმავლობაში ფოსფორის დიფუზიით ფოსფორსილიკატური ნარევის შემოსაზღვრული მოცულობიდან. p-n სტრუქტურების ორივე ზედაპირზე ელექტრული კონტაქტები ფორმირებულია ალუმინის თერმული აორთქლებით; მთლიანი - p-ტიპის ფუძემდებზე ,

ბადისებური - n-ტიპის არეში. P-n სტრუქტურის n-ფენის 5,4 მევ ენერგიის ალფა ნაწილაკებით დასხივება განხორციელდა Am-241 წყაროს გამოყენებით. საცდელი ნიმუშების მიკროსტრუქტურული კვლევა შესრულდა NMM-80RF/TRF სისტემის მეტალოგრაფიულ ოპტიკურ მიკროსკოპზე; ელექტროფიზიკური მახასიათებლების გაზომვები განხორციელდა Ecopia-3000 სისტემის დანადგარზე. ხოლო ვოლტ-ამპერული დამოკიდებულებებისა და პარამეტრების კვლევა შესრულდა Keithley 2400 სისტემის დანადგარზე.

შედეგები და ანალიზი

სტანდარტული განათების პირობებში განსაზღვრულია საცდელი p-n სტრუქტურის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები საწყის და ალფა-ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობებში. ნახ.1 წარმოდგენილია ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების გრაფიკების პირდაპირი შტოები, საიდანაც ნათლად ჩანს, რომ ალფა ნაწილაკების დასხივების ფლუენსის ამაღლება ამცირებს p-n სტრუქტურაზე აღძრული მოკლე ჩართვის დენის და ღია წრედის ძაბვის სიდიდეებს, ანუ იწვევს სინათლის ენერგიის ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნის ძირითადი პარამეტრების დეგრადაციას.



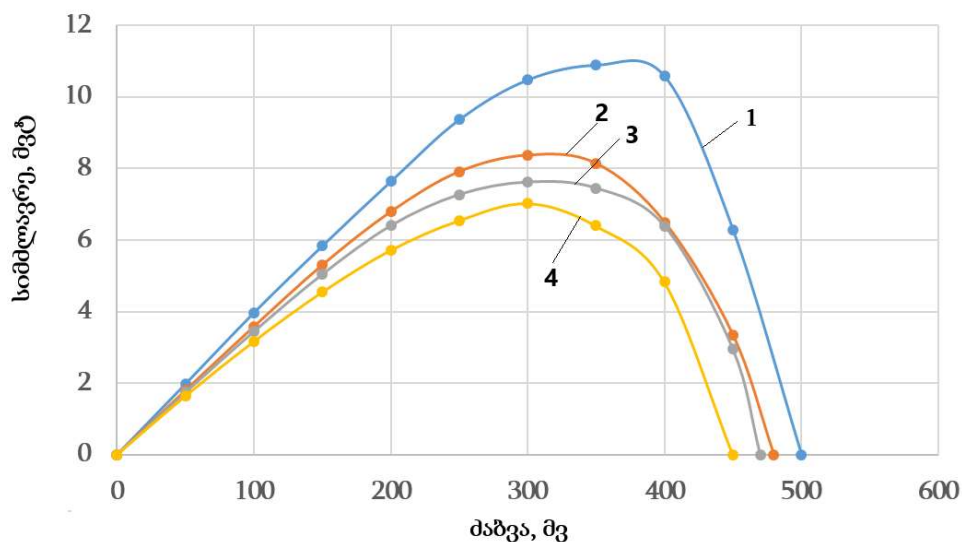
ნახ. 1. p-ტიპის Si+2ატ.%Ge ფუძეშრეზე ფორმირებული p-n სტრუქტურის ვოლტ-ამპერული დამოკიდებულებები

1. დაუსხივებელი,
2. ალფა-რადიაციის ფლუენსი - $5 \cdot 10^{11} \text{ სმ}^{-2}$
3. ალფა რადიაციის ფლუენსი - $1 \cdot 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$
4. ალფა რადიაციის ფლუენსი - $6 \cdot 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$

Si+2ატ.%Ge ფუძეშრეზე ფორმირებული p-n სტრუქტურის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ავლენენ მათ ცხად დამოკიდებულებას ალფა ნაწილაკების სხვადასხვა ფლუენსით დასხივებაზე, რაც თავის მხრივ განპირობებულია სტრუქტურული დამახინჯებების ფორმირებით ნახევარგამტარულ ფუძეშრესა და უშუალოდ p-n გადასასვლელზე. მეტალოგრაფიული კვლევით ნაჩვენებია, რომ ფუძეშრის საწყისი სტრუქტურა შეიცავს კრისტალიზაციისა და დამზადების პროცესებში ჩასახულ დისლოკაციებს. ვვარაუდოთ, რომ რადიაციული დეფექტები, განთავსებული უშუალოდ დისლოკაციებსა და მათ გარემომცველ

ატმოსფეროებსა და კრისტალურ მესერში განსხვავებული მექანიზმებით ცვლიან p-n სტრუქტურის ელექტროფიზიკურ პარამეტრებს. ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებულ კრისტალებში მაღალია ტექნოლოგიური მინარევების (ჟანგბადი, ნახშირბადი) კონცენტრაცია, რაც განაპირობებს რადიაციული დეფექტით გამდიდრებული დისლოკაციების გარემომცველი ატმოსფეროს ფორმირებას. ასეთ პირობებში მოსალოდნელია კუთრი ელექტროწინალობის შედარებით სუსტი მატება ალფა ნაწილაკების დასხივების ფლუენსის ამაღლებით, რადიაციული ცენტრების კონცენტრაციის ზრდა აამაღლებს დენის არაპირითადი მატარებლების გაბნევას და შესაბამისად, შეამცირებს მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობას. p-n სტრუქტურის ელექტრული პარამეტრების დეგრადაციის ერთ-ერთ მიზეზად შესაძლებელია განხილული იქნას სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობის კრისტალურ მესერში გერმანიუმის ატომებთან ლოკალიზებული დეფორმაციის არსებობა, რაც მნიშვნელოვნად აკონტროლებს დენის მატარებლების გაბნევას, დისლოკაციური და რადიაციული დეფექტების სივრცულ განაწილებასა და ელექტრულ აქტიურობას. აღნიშნულიდან გამომდინარე, Si-Ge შენადნობების p-n სტრუქტურების ელექტრული პარამეტრების მართვისა და პროგნოზირების პრობლემის გადასაწყვეტად აუცილებელია მათი შესწავლა მალეგირებელი გერმანიუმის კონცენტრაციისა და დისლოკაციების სიმკვრივის ფართო დიაპაზონში სხვადასხვა წარმოშობის რადიაციის პირობებში.

საკვლევი p-n სტრუქტურის ფოტოელექტრული გარდაქმნის ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ექსტრემალური მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის აგებულია ძაბვის ამაღლების პირობებში სიმძლავრე - ძაბვის გრაფიკები (ნახ.2) . მიღებული გრაფიკებიდან განისაზღვრა სიმძლავრის , დენის ძალისა და ძაბვის მაქსიმალური სიდიდეები.



ნახ.2. p-ტიპის Si+2ატ.%Ge შენადნობის ფუძემდებზე ფორმირებული p-n სტრუქტურის სიმძლავრე-ძაბვის დამოკიდებულებები

1. დაუსხივებელი,
2. ალფა-რადიაციის ფლუენსი $5 \cdot 10^{11} \text{ სმ}^{-2}$

3. ალფა რადიაციის ფლუენსი $1 \cdot 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$
4. ალფა რადიაციის ფლუენსი $6 \cdot 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$

მიღებული გრაფიკული დამოკიდებულებებიდან განისაზღვრა დენის ძალის, ძაბვის და სიმძლავრის მაქსიმალური სიდიდეები. მათი გამოყენებით გამოთვლილია ნახ.1.- ზე წარმოდგენილი ვოლტ-ამპერული დამოკიდებულებების ფორმის ფაქტორის (ff) და მ.ქ.კ. -ის (η) მნიშვნელობები ცნობილი ფორმულების საფუძველზე [5];

$$ff = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{max}} \cdot ff$$

სადაც V_{max} და I_{max} წარმოადგენენ ძაბვისა და დენის სიდიდის მაქსიმალურ მნიშვნელობებს.

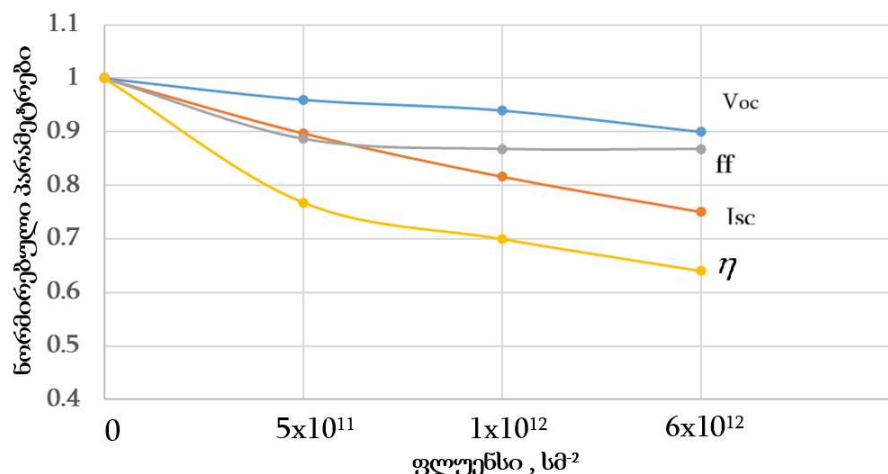
ალფა ნაწილაკების სხვადასხვა ფლუენსით დასხივებული p-n სტრუქტურის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი ნათლად არის ასახული ცხრილში 1.

p-Si+2ატ%Ge შენადნობის ფუძეშერეზე ფორმირებული p-n სტრუქტურის ელექტრული პარამეტრების დამოკიდებულება ალფა ნაწილაკებით დასხივების ფლუენსზე

ცხრილი 1.

ალფა რადიაციის ფლუენსი, სმ^{-2}	V_{oc} , მვ	I_{sc} , მა/სმ ²	V_{max} , მვ	I_{max} , მა/სმ ²	ff	η , %	S, სმ ²
0	500	40.70	350	31.12	0.53	10.89	2.72
$5 \cdot 10^{11}$	480	37.24	300	27.93	0.47	8.37	2.148
$2 \cdot 10^{12}$	470	35.20	300	25.41	0.46	7.62	2.44
$5 \cdot 10^{12}$	450	33.79	300	23.45	0.46	7.03	2.9

ნახ.3.-ზე წარმოდგენილია სხვადასხვა ფლუენსის ალფა ნაწილაკებით დასხივებული Si+2ატ.%Ge შენადნობის p-n სტრუქტურის პარამეტრები, რომლებიც ნორმალიზებულია დაუსხივებელი მდგომარეობის მახასიათებელ პარამეტრებთან.



ნახ.3. SiGe p-n სტრუქტურის ნორმირებული პარამეტრების (V_{oc} , I_{sc} , ff , η) დამოკიდებულება ალფა ნაწილაკების დასხივების ფლუენსზე

ალფა რადიაციის ფლუენსის განსაზღვრულ დიაპაზონში ექსპერიმენტული p-n სტრუქტურის ყველა პარამეტრი თავისებური კანონზომიერებით იცვლება. მიღებული შედეგების თანახმად საგრძნობლად მცირდება მოკლე ჩართვის დენისა და ეფექტურობის მნიშვნელობები, ხოლო შევსების ფაქტორისა და უქმე სვლის ძაბვა (ემპ) შედარებით სუსტი ვარდნით ხასიათდება. ცნობილია [6], რომ სილიციუმის მზის ელემენტებში დენის არაპირითადი მახასიათებლების სიცოცხლის ხანგრძლივობა გამა რადიაციის გავლენით საგრძნობლად მცირდება. ეს გარემოება მნიშვნელოვნად აუარესებს მოკლე ჩართვის დენის სიდიდეებს. დენის არაპირითადი მატარებლების სიცოცხლის ხანგრძლივობა მგრძნობიარეა რადიაციით ინდუცირებული დეფექტებისადმი, რომლებიც მოქმედებენ როგორც რეკომბინაციის ცენტრები. მათი რეკომბინაციის სიჩქარის ამაღლება უკუპროპორციულად ამცირებს დენის არაპირითადი მატარებლების სიცოცხლის ხანგრძლივობას [7].

სილიციუმზე შექმნილი მზის ელემენტის ანალოგიურად შესაძლებელია ვივარაუდოთ ექსპერიმენტულ $\text{Si}+2\text{ატ.}\% \text{Ge}$ შენადნობზე ფორმირებული p-n სტრუქტურის I_{sc} და η პარამეტრების დეგრადაციის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზად ალფა რადიაციით განპირობებული წერტილოვან რადიაციულ დეფექტებზე დენის არაპირითადი მატარებლების გაბნევა.

ლიტერატურა

1. P. Rupnowski, B. Sopori. Strength of silicon wafers: fracture mechanics approach. *International Journal of Fracture* 155, 67–74 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9324-9>
2. Jiahe Chen, Deren Yang, Xiangyang Ma, Zhidan Zeng, Daxi Tian, Liben Li, Duanlin Que, Longfei Gong. “Influence of Germanium Doping on the Mechanical Strength of Czochralski Silicon Wafers.” *Journal of Applied Physics* 103 (12) 123521-1 - 123521-6 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2943272>
3. Xuegong Yu, Peng Wang, Deren Yang. Effect of germanium on the kinetics of boron-oxygen defect generation and dissociation in Czochralski silicon. *Applied Physics Letters*, 97(16), 162107-1 – 162107-3 (2010) <https://doi.org/10.1063/1.3505499>
4. Deren Yang, Jiahe Chen, Hong Li, Xiangyang Ma, Daxi Tian, Liben Li, Duanli Que. Micro-defects in Ge-doped Czochralski grown Si crystals. *Journal of Crystal Growth*, 292(2), 266-271 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.04.022>
5. Davud Mostafa Tobnaghi, Ali Rahnamaei, and Mina Vajdi. Experimental Study of Gamma Radiation Effects on the Electrical Characteristics of Silicon Solar Cells. *International Journal of Electrochemical Science* 9 (6): 2824-2831 (2014).
6. Khumar Ali, Sohail A. Khan, M. Z. Matjafri, ⁶⁰Co γ-irradiation effects on electrical characteristics of monocrystalline silicon solar cell. *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 7831-7841 (2013). Retrieved from <http://www.electrochemsci.org>
7. J. Kuendig, M. Goetz, A. Shah, E. Fernandez. Thin film silicon solar cells for space applications: Study of proton irradiation and thermal annealing effects on the characteristics of solar cells and individual layers. *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 79(4), 425-438 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00486-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00486-5)

Effect of Alpha-Particle Irradiation on the Electrophysical Properties of the p-n Junction on the p-type Si+2 at.% Ge Alloy

Ia Kurashvili, Ekaterine Sanaia, Nino Kitoshvili, Avtandil Sichinava, Giorgi Darsavelidze

Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology, Tbilisi, Georgia

The electrophysical and current-voltage characteristics of the p-n junction created on the p-type monocrystalline Si+2at.%Ge substrate have been studied under alpha particle irradiation at varying fluences. The changes in the electrical characteristics of the p-n junction in both the initial and irradiated states were investigated. It was found that, with increasing alpha particle fluence, the short-circuit current and photoelectric conversion efficiency significantly decrease, while the fill factor and open circuit voltage decrease only slightly.

The mechanisms of the electrical characteristics degradation of the p-n junction under alpha radiation are analyzed. It is proposed that the significant decrease in short-circuit current and conversion efficiency may be attributed to a reduction in the lifetime of minority current carriers. The contribution of localized deformation near Ge atoms, the spatial distribution of the impurity-radiation defect complex surrounding dislocations, and the electrical activity and stability of these defects in the formation of the electrophysical properties of the p-n junction on the Si+2at.%Ge substrate are discussed.

Keywords: Si-Ge alloy, p-n junction, current-voltage characteristic, short-circuit current, efficiency, fill factor.