

ნახევარგამტარული სილიციუმის იონიმპლანტაციური ნეიტრონების დეტექტორი ეროვნული თავდაცვისა და უსაფრთხოებისათვის

ანზორ გულდამაშვილი

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის
მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი,
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი

გურამ ბოკუჩავა

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის
მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი,
ფიზიკის აკადემიური დოქტორი

გიორგი არჩუაძე

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის
მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი,
ფიზიკის აკადემიური დოქტორი

იური ნარდაია

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის
მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი,
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი

ავთანდილ სიჭინავა

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის
მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი,
ფიზიკის აკადემიური დოქტორი

რევაზ მელქაძე

მიკრო და ნანოელექტრონიკის ინსტიტუტის
მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი
დირექტორის მოადგილე,
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

ნოდარ გაფიშვილი

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტის
უფროსი მეცნიერ-თანამშრომელი,
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

აბსტრაქტი

ნეიტრონების დეტექტორებისათვის შექმნილია და შესწავლილია სილიციუმის იონიმპლანტაციური p-n გადასასვლელიანი პლანარული დიოდი. დიოდის p-ფენა ერთდროულად ნეიტრონების კონვერტერს წარმოადგენს. 10B იონებით მონოკრისტალური Si-ის თანამიმდევრული იმპლანტაციით შექმნილია 1 და 0.25 სმ² ფართობის დიოდების პარტია. p-n გადასასვლელზე 623 K ტემპერატურაზე დაფენილია 100 და 140 ნმ სისქის Ti-Au ომური კონტაქტები. შესწავლილია დიოდების ვოლტამპერული მახასიათებლები. 20 ვ უკუძაბვის დროს 1 სმ² ფართობის დიოდების გაჟონვის დენებმა 11.7-12 მკა შეადგინა, ხოლო 0.25 სმ² ფართობის დიოდებისთვის 8.44-9.55 მკა.

შემუშავებულია დეტექტორის ელექტრონული სისტემის პირველი პროტოტიპი, რომლის გამოყენებით განსაზღვრულია იმპულსური კვების ბლოკის ხმაურის დონე და მისი ფილტრაციის მეთოდები. ასევე ხმაურის ზემოქმედება დეტექტორის მგრძობიარე ანალოგურ ნაწილზე და ანალოგური კვანძის ეკრანირების სხვადასხვა მეთოდი. პირველი პროტოტიპის ტესტირების შედეგების გათვალისწინებით შემუშავებულია დეტექტორის მოდიფიცირებული, ფუნქციური პროტოტიპი. მოდიფიცირებულია პრინციპული სქემა და შემუშავებულია ბეჭდური დაფები. შემუშავებულია სისტემის მართვის პროგრამის პირველი ვერსია.

საკვანძო სიტყვები:

სილიციუმი, იონური იმპლანტაცია, 10B, ნეიტრონი, დეტექტორი, კონვერტერი, ელექტრონული სისტემა, ფუნქციური პროტოტიპი

The Ion Implanted Neutron Detector of Semiconducting Silicon for National Defence and Security

Anzor Guldamashvili

Chief Research Scientist,
Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,
Doctor of Sciences in Physics and Mathematics

Guram Bokuchava

Chief Research Scientist,
Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,
PhD in Physics

Giorgi Archuadze

Chief Research Scientist,
Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,
PhD in Physics

Yuri Nardaia

Chief Research Scientist,
Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,
Doctor of Sciences in Physics and Mathematics

Avtandil Sichinava

Chief Research Scientist,
Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,
PhD in Physics

Revaz Melkadze

Chief Research Scientist,
Deputy Director of Institute of Micro- and Nanoelectronics,
Candidate of Sciences in Physics and Mathematics

Nodar Gapiashvili

Chief Research Scientist,
Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,
Candidate of Sciences in Physics and Mathematics

Abstract

The ion implanted silicon planar diode with a p-n junction for neutron detection has been formed and studied. At the same time, the p-layer of diode is the converter of neutrons. A batch of diodes with the area of 1 and 0.25 cm² is obtained (formed) by successive ¹⁰B ion implantation of monocrystalline Si. Ti and Au ohmic contacts of 100 and 140 nm are deposited on the p-n junction at a temperature of 623 K. The current-voltage characteristics of diodes were studied. At a reverse voltage of 20 V, the current leakage is 11.7-12 μA for 1 cm² diodes and 8.44-9.55 μA for 0.25 cm² diodes, respectively.

The first prototype of the detector electronic system has been developed and by using this system, the noise level and noise filtration methods for the switching power supply as well as the noise impact on sensitive analog parts of the detector, and different shielding methods of analog node have been determined. Based on the first prototype test results, a modified, functional prototype of the detector has been developed. The principle scheme has been modified and the printed circuit boards have been developed. The first version of the system management program has been developed.

Keywords:

Silicon, ion implantation, ¹⁰b, neutron, detector, converter, electronic system, functional prototype

შესავალი

ბირთვული უსაფრთხოებისათვის სხვადასხვა სახეობისა და დანიშნულების მაიონებული გამოსხივების დეტექტორები გამოიყენება¹. მათ შორის აღსანიშნავია ნეიტრონების ნახევარგამტარული დეტექტორები². სენსორებში ნეიტრონების რეგისტრაცია შთანთქმის მაღალი კვითის მქონე მასალებში ნეიტრონებით დასხივების დროს მიმდინარე ბირთვული რეაქციის პროდუქტებით ხორციელდება. ერთერთი ასეთი ნუკლიდის შემცველობის ნივთიერების კილიტა ნეიტრონების მშთანთქმელად - კონვერტერად გამოიყენება. სამომხმარებლო ბაზარზე არსებობს სხვადასხვა ტიპის დეტექტორები დამოუკიდებელი კონვერტერით³. თანამედროვე მოთხოვნები განაპირობებენ ახალი კლასის ნეიტრონების ნახევარგამტარული დეტექტორების შექმნის აუცილებლობას. ამდენად, ინოვაციური მეთოდებით გაუმჯობესებული ექსპლუატაციური მახასიათებლების დეტექტორების კლასის და მათი ფუნქციონალური შესაძლებლობების არეალის გაფართოება მეტად აქტუალურია. ნეიტრონების ნახევარგამტარული დეტექტორების შექმნისათვის სხვადასხვა ტექნოლოგიურ მეთოდებს შორის იონური იმპლანტაციის გამოყენება⁴ პერსპექტიულ მეთოდად მიგვაჩნია. წონასწორული თერმოდინამიკის მოთხოვნებისაგან განსხვავებულ პირობებში იონური იმპლანტაციით შესაძლებელია ისეთი პარამეტრების დეტექტორების შექმნა, რომელთა განხორციელება სხვა მეთოდებით შეუძლებელია⁵.

სტატიაში წარმოდგენილია ნახევარგამტარული სილიციუმის იონიმიპლანტაციური ნეიტრონების მიკროპროცესორიანი დეტექტორის შექმნის პროცედურა. შემოთავაზებული დეტექტორი სილიციუმის p-n გადასასვლელიანი პლანარული დიოდა, რომლის აქცეპტორული გამტარობის ინვერსიული p - ფენა ერთდროულად ნეიტრონების კონვერტერს წარმოადგენს.

კონვერტერის შექმნა მაღალი ომური წინაღობის ელექტრონული გამტარობის მონოკრისტალური სილიციუმის ¹⁰B იზოტოპის მაღალი ფლუენსის იონების იმპლანტაციით ხორციელდება. მაიონიზებული ნაწილაკების რეგისტრაცია იზოტოპ ¹⁰B-ის ნუკლიდებთან ნეიტრონების ურთიერთქმედებების შედეგად ბირთვული რეაქციის ¹⁰B(n,α)⁷Li დაშლის პროდუქტების ჰელიუმისა ⁴He (1471 კევ, 11777კევ) და ლითიუმის ⁷Li (839 კევ, 1010 კევ) ნაწილაკების აღრიცხვით მიმდინარეობს. დეტექტორის და ელექტრონული სქემის დაპროექტება ხორციელდება სხვადასხვა პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით. დამოუკიდებელი კონვერტერის და გამოსხივებისადმი არამგრძობიარე ნაწილის არარსებობა გაზრდის დეტექტორის ნეიტრონების რეგისტრაციის ეფექტურობას და დეტექტორის საიმედოობას, გაამარტივებს მის წარმოებას, ექსპლუატაციას და შეამცირებს ღირებულებას.

წარმოდგენილი ნაშრომი წარმოადგენს სფტი-ში ავტორების მრავალწლიანი მუშაობის გაგრძელებას⁶. იგი შეესაბამება იონური იმპლანტაციის განვითარების თანამედროვე ეტაპსა და ქვეყნის თავდაცვისა და უსაფრთხოების უზრუნველყოფის პრობლემებს.

1. მასალები და მეთოდები

1.1. საწყისი მასალები

საწყის მასალად გამოყენებულია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული მაღალომური და არამირითადი მუხტის მატარებლების მაღალი სიციცხლის ხანგრძლივობის, <100> კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის, 50.8 მმ დიამეტრისა და 500 მკმ სისქის n - ტიპის Si-ის ფირფიტები. მისი ორმხრივგაპრიალებული პარალელური ზედაპირების სიმქისე შეადგენს შესაბამისად Ra = 6.2 და 8.1 ნმ-ს, რომელიც აკმაყოფილებს იონური იმპლანტაციისა და იმპლანტირებული მასალების თვისებების კვლევის მეთოდოლოგიურ მოთხოვნებს.

1.2. მზომბავი ნაწილაკების რადიაციული მახასიათებლები

ნახევარგამტარული მასალების იონური იმპლანტაციის ტექნოლოგიის შერჩევისათვის, მათი ელექტროფიზიკური თვისებებისა და მისგან შექნილი დიოდების და დეტექტორების პარამეტრების ინტერპრეტაციისათვის გამოთვლილია სილიციუმის მზომბავი ნაწილაკების რადიაციული მახასიათებლები. მახასიათებლებად შერჩეულია სილიციუმის მზომბავი ¹⁰B იონებისა და ბირთვული რეაქციის ¹⁰B(n,α)⁷Li დაშლის პროდუქტების - ⁴He და ⁷Li ნაწილაკების განარბენებისა და წარმოქმნილი

1 Syed Naeem Ahmed. Physics and Engineering of Radiation Detection. Amsterdam, Elsevier, 2014.

2 Owens Alan. Semiconductor Radiation Detectors. Boca Raton London New York, Taylor & Francis Group, 2019.

3 Sallaska A.L., Hoedl S., Garcia A., Melconian D., Young A.R., Geltenbort P., Sjue S.K.L., Holley A.T.. Characterization of Thin-foil Ultracold Neutron Detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A603 (2009): pp. 421-428.

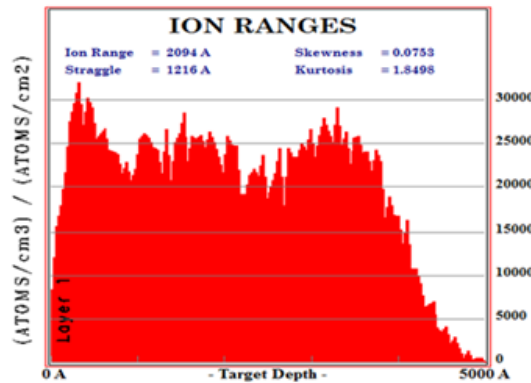
4 Nastasi M., Mayer Y.W.. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Berlin, Springer, 2006.

5 ORTEC-Catalog-Detectors-Section. ORTEC <http://www.ortec-online.com>. 801 South Illinois Ave., Oak Ridge, TN 37831-0895 U.S.A.

6 Vinogradova I., Gverdsiteli I., Guldashvili A., Golubkov V. Ion-doped Semiconductor Spectrometric Detector. (in Russ.). Pribory i Technika Experimenta, №2, (1972): pp.41-43.

წერტილოვანი რადიაციული დეფექტების სივრცული განაწილების პარამეტრები. პარამეტრების გამოთვლა განხორციელდა კომპიუტერზე SRIM-2013 და TRIM-2013 პროგრამებით⁷.

დეტექტორის ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად შეირჩა სილიციუმში ბორის იონების თანამიმდევრული იონური იმპლანტაციის პროცესი და ჩატარდა მისი მოდელირება (ნახ.1).



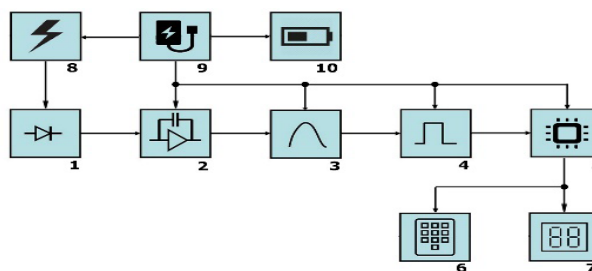
ნახ.1. TRIM-2013 პროგრამით მიღებული სილიციუმში 100, 65, 35 და 20 კევ ენერგიის თანამიმდევრული იმპლანტაციით ¹⁰B იონების განარბენების განაწილების პროფილი.

ბორის იონების სილიციუმის ატომებთან ურთიერთქმედება განიხილებოდა იონ-ატომური ურთიერთქმედების ბინარულ მოდელში, წანაცვლებული სამიზნის ატომების სრული კასკადის მიახლოებაში. ზედაპირის 370 ნმ სისქის ფენაში მიიღება 2.5×10^{20} სმ⁻³ კონცენტრაციის თანაბრად განაწილებული ¹⁰B ატომები. აღსანიშნავია, რომ იონების გაფრქვევის კოეფიციენტი არ აღემატება 0.2 ატ/იონ., ამიტომ სილიციუმის ზედაპირის მნიშვნელოვანი ეროზია მოსალოდნელი არ არის.

კომპიუტერული გათვლების ანალიზის შედეგად შეირჩა სილიციუმის სხვადასხვა ენერგიის ¹⁰B იონებით თანამიმდევრული იონური იმპლანტაციის რეჟიმი E ენერგიისა და Φ ფლუენსებისათვის. იონების ენერგიებია: E=100-65-40-25-20 კევ, ფლუენსები შესაბამისად: Φ=1·10¹⁶-2.8·10¹⁵-4·10¹⁵-3.3·10¹⁵-3.1·10¹⁵სმ⁻². იმპლანტაცია განხორციელდა დანადგარზე ВЕЗУВИЙ 3М, სადაც იონების წყაროში სამუშაო ნივთიერებად გამოყენებულია აირადი ¹⁰BF₃. შერჩეულია დენის სიმკვრივის მნიშვნელობა 10-15 მკა/სმ² - ის ფარგლებში, რაც შესაძლებლობას გვაძლევს თავიდან ავიცილოთ სამიზნე ნიმუშების გადახურება. პროცესის მსვლელობისას სამიზნის ტემპერატურა არ აღემატებოდა 330K-ს.

2.1. დეტექტორის ელექტრონული სისტემის განვითარება

შემუშავებული პერსონალური დეტექტორის ცალკეული კვანძებისა და მათი ერთმანეთზე ზემოქმედების შესწავლისათვის შეიქმნა დეტექტორის პირველი პროტოტიპი. მისი გამოყენებით შესწავლილია დეტექტორის ანალოგური კვანძი და იმპულსური კვების ბლოკი. ნახ.2-ზე წარმოდგენილია დეტექტორის ბლოკ სქემა



ნახ.2. დეტექტორის ბლოკ სქემა: 1- დეტექტორი; 2- წინასწარი გამამდიერებელი; 3-მაფორმირებელი გამამდიერებელი; 4-კომპარატორი; 5-მიკროპროცესორული ბლოკი; 6-კლავიატურა; 7- თხევადკრისტალური დისპლეი; 8-წანაცვლების ძაბვის გენერატორი; 9- კვების ბლოკი ბატარეის მართვით; 10- ბატარეა;

პროტოტიპის გამოყენებით განსაზღვრულია იმპულსური კვების ბლოკის ხმაურის დონე და მისი ფილტრაციის მეთოდები, ხმაურის ზემოქმედება დეტექტორის მგრძობიარე ანალოგურ ნაწილზე და ანალოგური კვანძის ეკრანირების სხვადასხვა მეთოდი⁸. ანალოგური კვანძი მოდელირებულია

7 Ziegler James F., Ziegler M.D., Biersack J.P. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter. Nucl. Inst. Met. Phys. Res. B. 268(2010); pp.1818-1823.

8 Ott H.W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems (2nd edd.), New York, Wiley,1988.

LTSpice-ში⁹. ტესტირება ჩატარდა იმპულსების გენერატორისა და 39dB შეთანხმებული ატენუატორის საშუალებით ანალოგური კვანძის შესასვლელზე, სილიციუმში 1მეგ-ის ექვივალენტური დენის იმპულსების მიწოდებით, რომელიც განხორციელდა იმპულსების გენერატორიდან ძაბვის იმპულსით 2.2 პგ ტევადობის კონდენსატორის გავლით. სილიციუმში 1მეგ-ის ექვივალენტური მუხტი:

$$1\text{მეგ (Si)} = (1\text{ მეგ} \times 1.6 \times 10^{-19}\text{კ} / 3.6\text{ ევ}) = 0.044 \times 10^{-12}\text{კ}$$

აქედან გამოთვლილია შემავალი იმპულსის ამპლიტუდა:

$$V = Q / C = (0.44 \times 10^{-12}\text{კ}) / (2.2 \times 10^{-12}\text{ფ}) = 20\text{ მვ}$$

3. შედეგები

3.1. იონიზაციური დიოდური სტრუქტურების შექმნა-შესწავლა.

ჩატარებული პროცედურების შედეგად მიღებულია p-n სტრუქტურები, რომლის ინვერსიული p-ფენა ერთდროულად ნეიტრონების კონვერტერსაც წარმოადგენს.

152.2 მმ დიამეტრის სფეროზე მიღებული მიკროშლიფის დეკორირებით გაიზომა ინვერსიული ფენების სისქე. დადგენილმა p-n გადასასვლელის სიღრმემ შეადგინა 0.3 მკმ (მოწვამდე) და 0.35 მკმ (მოწვის შემდეგ).

თანამიმდევრული იონური იმპლანტაციით მიღებულ დიოდებზე დანადგარზე YBH-71Π3 დაიფინა შესაბამისად 100 და 140 ნმ სისქის Ti და Au ომური კონტაქტების ფენები, ხოლო ნიმუშების უკანა, არაიონიზირებულ მხარეზე შეიქმნა იმავე სისქის Ti – Au-ის ომური კონტაქტები. ომური კონტაქტების შეცხოვა განხორციელდა Heatpulse 21OT-02 დანადგარზე ფოტონური მოწვით 350 °C ტემპერატურაზე 12 წმ-ის განმავლობაში. შედეგად დამზადებულია 1 სმ² და 0.25 სმ² ფართობის პლანარული p-n გადასასვლელიანი დიოდების პარტია. Keithley 2401 ხელსაწყოზე შესწავლილია მიღებული დიოდების ვოლტამპერული მახასიათებლები. 20 ვ უკუძაბვის დროს დიოდების გაჟონვის დენებმა შესაბამისად შეადგინა 11.7-12 მკა 1 სმ² ფართობის დიოდებზე და 8.44-9.55 მკა 0.25 სმ² ფართობის დიოდებზე.

3.2. დეტექტორის ელექტრონული სისტემის ფუნქციური პროტოტიპის განვითარება

პირველი პროტოტიპის ტესტირების შედეგების გათვალისწინებით შემუშავდა დეტექტორის მოდიფიცირებული, ფუნქციური პროტოტიპი.

სისტემის ხმაურისადმი მგრძობიარე ნაწილის განცალკევებისთვის და მისი ეფექტურად ეკრანი-რებისათვის სისტემა გაიყო ორ დამოუკიდებელ ნაწილად: ძირითადი ბლოკი და ანალოგური ბლოკი, რამაც დამატებით უზრუნველყო სისტემის მინიატურზაცია. ძირითად ბლოკში თავმოყრილია: ბატარეა, ბატარეის დამმუხტავი, ბატარეის მუხტის განმსაზღვრელი სისტემები, იმპულსური კვების ბლოკები, მიკროპროცესორი, ინფორმაციის ინდიკაციისა და მონაცემთა შეყვანის სისტემები და ბლუთუზისა და USB საკომუნიკაციო მოდულები. ანალოგურ ბლოკში თავმოყრილია ნეიტრონების სენსორი, წინასწარი და მაფორმირებელი გამაძლიერებლები და ანალოგური სიგნალის დამუშავების შუალედური კვანძები.

მიღებული შედეგების ღირებულება და აქტუალობა მდგომარეობს მაიონებელი გამოსხივების დეტექტორებზე არსებულ მოთხოვნებსა და სერიული წარმოების შესაძლებლობაში. დეტექტორები გამოყენებული იქნება საჯარისო ნაწილებისა და სპეციალური დანიშნულების დანაყოფებში ქვეყნის თავდაცვისუნარიანობის და ეროვნული უსაფრთხოების, ბირთვული და რადიაციული უსაფრთხოების, ბირთვული ტერორიზმისაგან თავდაცვის უზრუნველყოფისათვის. დეტექტორები განთავსდება საჰაერო, საზღვაო, რკინიგზის სადგურებსა და საზღვაო საბაჟოებზე. დეტექტორების გამოყენება შესაძლებელია გარემოს დაცვის, ბირთვული ენერგეტიკული დანადგარების უსაფრთხო ექსპლუატაციის უზრუნველყოფისათვის, ბირთვულ ტექნოლოგიებში, ბირთვულ ფიზიკაში, გეოლოგიაში, ქიმიაში, ბიოლოგიაში, მედიცინასა და მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების სხვა დარგებში.

დასკვნა

1. გამოთვლილია Si-ის მზომბავი სხვადასხვა ენერგიის ¹⁰B იონების, ბირთვული რეაქციის პროდუქტების ⁴He და ⁷Li ნაწილაკების რადიაციული მახასიათებლების განაწილების პარამეტრები. კომპიუტერული მოდელირება განხორციელებულია SRIM-2013 და TRIM-2013 პროგრამებით.

Goulding F.S. Pulse Shaping in Low-Noise Nuclear Amplifiers: A Physical Approach to Noise Analysis. Nucl. Instr. Meth. 100 (1972): pp.493–504

9 Van der Plas G., Gielen G., Sansen W. M. C. A Computer-aided Design and Synthesis Environment for Analog Integrated Circuits. Analog Circuits and Signal Processing, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

2. ჩატარდა თანამიმდევრული იონური იმპლანტაცია სხვადასხვა ენერჯისა (E) და ფლუენსის (Φ) ¹⁰B იონებით შემდეგ პირობებში: E₁=100 კეე, Φ₁=1·10¹⁶ იონ·სმ⁻²; 2) E₂=65 კეე, Φ₂=2.8·10¹⁵ იონ·სმ⁻²; 3) E₃=40 კეე, Φ₃=4·10¹⁵ იონ·სმ⁻²; 4) E₄=25 კეე, Φ₄=3.3·10¹⁵ იონ·სმ⁻²; 5) E₅=20 კეე, Φ₅=3.1·10¹⁵ იონ·სმ⁻².
3. შექმნილია სილიციუმის იონიმიპლანტაციური p-n გადასასვლელიანი პლანარული დიოდი. დიოდის p-ფენა ერთდროულად ნეიტრონების კონვერტერს წარმოადგენს.
4. დამუშავებულია ინვერსიული ფენების ელექტროფიზიკური პარამეტრების გაზომვის მეთოდიკა და შესწავლილია ნიმუშების კუთრი წინაღობა, მუხტის მატარებლების კონცენტრაცია და ძვრადობა.
5. ელექტრონული სისტემის პირველი პროტოტიპის ტესტირების შედეგების გათვალისწინებით შემუშავებულია დეტექტორის ფუნქციური პროტოტიპი. ფუნქციური პროტოტიპი აღჭურვილია სიგნალის დამუშავების სრული, ანალოგური და ციფრული კვანძებით, USB და Bluetooth საკომუნიკაციო მოდულებითა და ინფორმაციის აუდიო და ვიზუალური ინდიკაციის საშუალებებით.
6. შემუშავებული პორტატული დეტექტორის ელექტრონული სისტემის გამოყენება შესაძლებელია ნებისმიერი ტიპის ნახევარგამტარული რადიაციის სენსორისათვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

- Syed Naeem Ahmed. Physics and Engineering of Radiation Detection. Amsterdam, Elsevier, 2014;
- Grupen Claus, Buvat Irène /Editors. Handbook of Particle Detection and Imaging. Berlin Heidelberg Springer-Verlag 2012;
- Knoll Glenn F.. Radiation Detection and Measurement. Fourth Edition. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc. 2010;
- Owens Alan. Semiconductor Radiation Detectors. Boca Raton London New York, Taylor & Francis Group, 2019;
- Lutz Gerhard. Semiconductor Radiation Detectors. Device Physics. Berlin Heidelberg New York, Springer 2007;
- Sallaska A.L., Hoedl S., Garcia A., Melconian D., Young A.R., Geltenbort P., Sjue S.K.L, Holley A.T.. Characterization of Thin-foil Ultracold Neutron Detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A603 (2009): pp. 421–428;
- McGregor D.S., Bellinger S.L., Fronk R.G., Henson L., Huddleston D., Ochs T., Shultz J.K., Sobering T.J., Taylor R.D., “Development of Compact High Efficiency Microstructured Semiconductor Neutron Detectors,” Rad. Phys. Chem., 116(2015):pp.32-37;
- Nikolic R. J., Shao Q., Voss L. F., Conway A. M., Radev R., Wang T. F., Dar M., Deo N., Cheung C. L., Fabris L., Britton C. L. and Ericson M. N., “Si Pillar Structured Thermal Neutron Detectors: Fabrication Challenges and Performance Expectations.” SPIE Micro. Nano. Tech. Sen. Sys. App.III., 803109 (2011);
- Nastasi M., Mayer Y.W.. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Berlin, Springer, 2006;
- ORTEC-Catalog-Detectors-Section. ORTEC <http://www.ortec-online.com>. 801 South Illinois Ave., Oak Ridge, TN 37831-0895 U.S.A;
- Guldamashvili A., Bokuchava G., Archuadze G., Nardaia Iu., Nebieridze Ts., Sichinava A., Gapishvili N.. Development of Technological Conditions of Ion Implantation of Silicon by Boron for Ion Implanted Neutron Sensors. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, New Series,12, №1, (2018): pp. 54-60;
- Guldamashvili A., Bokuchava G., Archuadze G., Nardaya Yu., Nebieridze Ts., Sichinava A., Gapishvili N.. Ion Implanted Silicon Diode for Neutron Detection. GADEST 2017, Lopota, Georgia. Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology XVII. Program & abstract booklet. Ivane Javakhishvili Tbilisi State University. 2017;
- Guldamashvili A., Bokuchava G., Nardaya Y., Nebieridze Ts., Sichinava A.. Ion-Implanted Semiconductor Neutron Sensor (IISNS). International Conference. Nuclear Radiation Nanosensors and Nanosensors Systems. Program & Abstracts.(6-9 March 2014 Tbilisi, Georgia). Tbilisi, Georgian Technical University,2014;
- Guldamashvili A.I., Bokuchava G.V., Kutelia R.N., Nebieridze Ts.M.. High Effective Ion-Implanted Semiconductor Neutron Detector. Bulletin Georgian-Academy Sciences, 172, №2(2005):pp.250-253;
- ISTC G-33, 1998. Design of the Processes for the Development of Ion-implanted Semiconductor Thermal Neutron Detectors. / Project manager: Guldamashvili A.I.;
- Guldamashvili A.I., Kutelia R.N., Sadagashvili M.I. Ion-Implantation Semiconductor Detector Thermal Neutrons. Georgian Symposium for Project Development & Conversion. (Tbilisi, 18. 05. 1995). International Science and Technology Centre. Collection Reports. Tbilisi,(1995): pp.139-142;
- Agrba T., Gverdtsiteli I., Guldamashvili A., Jhirnov V., Shaumian T. Ion-doped Semiconductor Neutron Counter with High Detection Efficiency(in Russ.). Pribory i Technika Experimenta, №3(1979): pp.81-83;
- Gverdtsiteli I., Guldamashvili A., Jhirnov V., Agrba T., Shaumian T. Ion-doped Semiconductor Coordinate Detector of Charged Particles. (in Russ.). Pribory i Technika Experimenta, №2 (1978): pp.45-47;
- Gverdtsiteli I., Guldamashvili A., Jhirnov V. High-resolution Ion-doped Silicon Spectrometric Detector of α-particles(in Russ.). Proceedings of the VI All-Union Conference on the Physics of the Interaction of Char-

- ged Particles with Single Crystals. (Moscow, 26-28, 05, 1974). Moscow, MSU, 1975;
- Vinogradova I., Gverdtsiteli I., Guldashvili A., Golubkov V. Ion-doped Semiconductor Spectrometric Detector. (in Russ.). *Pribory i Technika Experimenta*, №2, (1972): pp.41-43;
- Ziegler James F., Ziegler M.D., Biersack J.P. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter. *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. B.* 268(2010): pp.1818-1823;
- Ott H.W. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems* (2nd edd.), New York, Wiley,1988;
- Goulding F.S. Pulse Shaping in Low-Noise Nuclear Amplifiers: A Physical Approach to Noise Analysis. *Nucl. Instr. Meth.* 100 (1972): pp.493-504;
- Van der Plas G., Gielen G., Sansen W. M. C. *A Computer-aided Design and Synthesis Environment for Analog Integrated Circuits.* Analog Circuits and Signal Processing, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.