

მექანიკური პოლირების გავლენა მონოკრისტალური p-SiGe ფუძემშრეების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებზე

ია ყურაშვილი¹, ტატინა მელაშვილი, ნარგიზა გოგოლაშვილი, გიორგი ჩუბინიძე, მარინა ქადარია, დავით მხეიძე, გიორგი დარსაველიძე

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო

¹ელ-ფოსტა: iakurashvili80@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4175-1946>

ანოტაცია. შესწავლილია მექანიკური პოლირების გავლენა მონოკრისტალური p-SiGe შენადნობების ფუძემშრეების სტრუქტურულად-მგრძობიარე ფიზიკურ თვისებებზე. ნაჩვენებია სხვადასხვა დისპერსულობის ალმასის ნაწილაკების შემცველი მაპოლირებელი კომპოზიციით დამუშავებული SiGe ფუძემშრეების (111) ორიენტაციის ზედაპირებზე ელექტრული მახასიათებლების, ინფრაწითელი გამოსხივების ოპტიკური შთანთქმის სპექტრების, შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის მნიშვნელობების არამონოტონური ცვლილებები. პოლირების პროცესში წარმოქმნილი დეფექტები ურთიერთქმედებენ მალეგირებელი ბორისა და ტექნოლოგიური წარმოშობის ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომებთან. ოთახის ტემპერატურის პირობებში მექანიკური დამუშავების პროცესში მიმდინარეობს დეფორმაციული წარმოშობის დეფექტების ფორმირება. ინფრაწითელი გამოსხივების შთანთქმის სპექტრებში გამოვლენილია კრისტალურ მესერში არსებული ნახშირბადისა და ჟანგბადის ატომების კონცენტრაციის შემცირება და Ci-Cs, Ci-Oi, V-O დეფექტები.

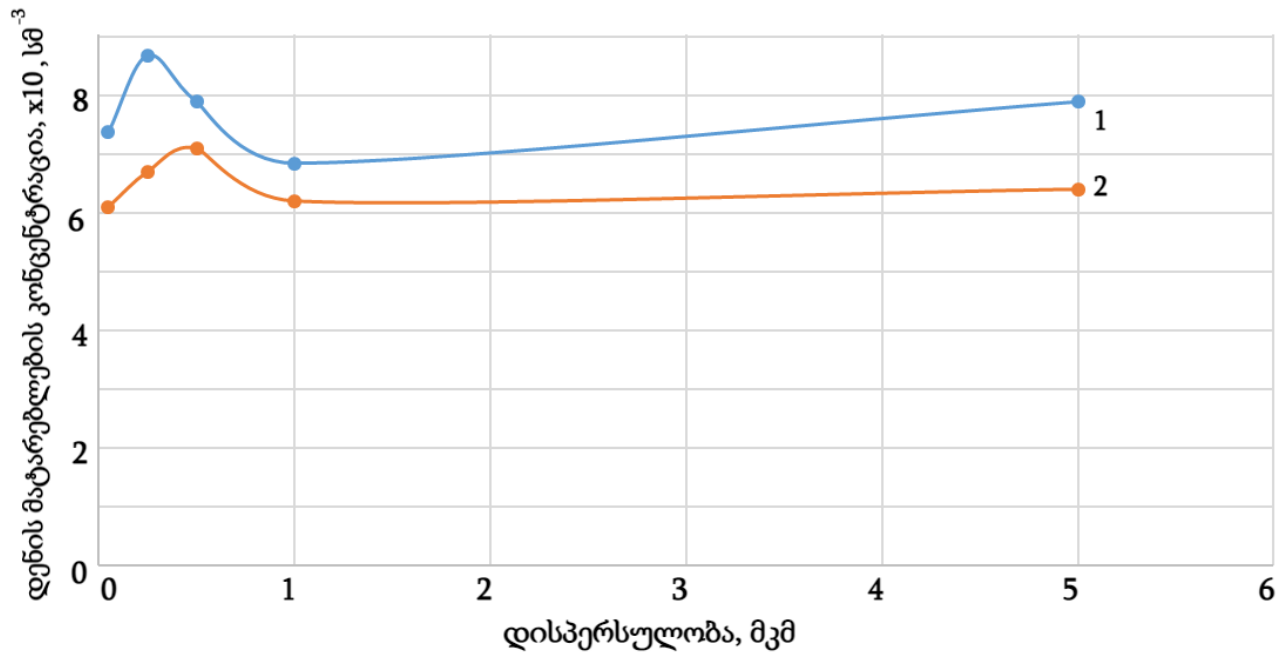
ნავარაუდევია, რომ SiGe ფუძემშრეების (111) სიბრტყეებზე ელექტროფიზიკური და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების არამონოტონური ცვლილებები გამოწვეულია მექანიკური პოლირების პროცესებში წარმოქმნილი დეფექტების ელექტრული აქტიურობისა და დისლოკაცია-დეფექტების ასოციაციების ურთიერთქმედების მექანიზმების ცვლილებებით.

საკვანძო სიტყვები: შენადნობები, პოლირება, დეფორმაციული დეფექტი, შინაგანი ხახუნი, ძვრის მოდული, ოპტიკური შთანთქმის სპექტრი.

ნახევარგამტარული მასალების ნამზადების (ფირები, ღეროები, ...) ზედაპირების მექანიკური დამუშავების პროცესებში წარმოიქმნება სტრუქტურული დეფექტები, რომლებიც იწვევენ ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ცვლილებებს. ზედაპირზე ფორმირებული დეფექტების სტრუქტურის, თერმული მდგრადობისა და ურთიერთქმედების მექანიზმების გაღრმავებული კომპლექსური შესწავლის საფუძველზე შესაძლებელია დადგინდეს ნახევარგამტარული პროფილირებული ნიმუშების ზედაპირული ფენების სტრუქტურული მდგომარეობისა და ელექტროფიზიკური თვისებების მიზანმიმართული მართვის საშუალებები. აღნიშნული მიმართულებით განხორციელებულია მონოკრისტალური სილიციუმის ფირების ექსპერიმენტული კვლევები [1,2]. დამუშავებულია სილიციუმის კრისტალურ მესერში მექანიკური ხევისა და პოლირებით გავრცობილი დეფექტების (დისლოკაციები, წყობის დეფექტები) ფორმირების მეთოდები, რითაც შესაძლებელია შეიქმნას ინფრაწითელი გამოსხივების დიაპაზონში ფოტოლუმინესცენციის ეფექტების გამოვლინების პირობები [3,4]. ნახევარგამტარული SiGe შენადნობების პროფილირებული ნიმუშების, კერძოდ მათი ფუძეშრების, ანალოგიური ხასიათის კვლევები პრაქტიკულად განხორციელებული არ არის. წინამდებარე ნაშრომში შესწავლილია სხვადასხვა დისპერსულობის ალმასის პასტებით პოლირებული მონოკრისტალური p-ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების სტრუქტურულად-მგრძობიარე ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი. ოთახის ტემპერატურის პირობებში ვანდერ ჰაუს მეთოდით განსაზღვრულია ელექტროფიზიკური მახასიათებლების (კუთრი ელექტროწინაღობა, დენის მატარებლების კონცენტრაცია, ძვრადობა) მნიშვნელობები; ინფრაწითელი გამოსხივების ფართო დიაპაზონში გამოკვლეულია ოპტიკური შთანთქმის სპექტრების შემადგენელი მაქსიმუმების მახასიათებლების ცვლილებები და გაანალიზებულია მათი წარმოშობის ბუნება. გრებითი რხევების მიღების ლოგარითმული დეკრემენტისა და სიხშირის რეგისტრაციით განსაზღვრულია სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული ნიმუშების შინაგანი ხახუნის ინტენსივობისა და ძვრის დინამიური მოდულის სიდიდეები.

ელექტრული მახასიათებლების დადგენის მიზნით ჰოლის ეფექტის რეგისტრაცია განხორციელდა Ecopia HMS-3000 სისტემის დანადგარზე.

ნახ.1-ზე წარმოდგენილია (111) ორიენტაციის სხვადასხვა შედგენილობის p-SiGe შენადნობების 0,5 მმ სისქის ფირების დენის მატარებლების კონცენტრაციის დამოკიდებულება მაპოლირებელი ალმასის პასტების დისპერსულობაზე.



ნახ.1. p-SiGe შენადნობების დენის მატარებლების კონცენტრაციის დამოკიდებულება მაპოლირებელი ალმასის პასტების დისპერსულობაზე.
 1. p-Si+2ატ.%Ge:B 2- p-Si+2,5ატ. %Ge:B

ნახაზიდან ჩანს დენის მატარებელი ხვრელების კონცენტრაციის ცვლილების არამონოტონურობა, რაც მკვეთრად ვლინდება მაპოლირებელი მასალის დისპერსულობის 0-5 მკმ დიაპაზონში. მეტად მცირე დისპერსულობის მასალით პოლირების პროცესში მოსალოდნელია ძლიერ ლოკალიზებულ არეებში ვაკანსიებისა და მიკრობზარების წარმოქმნა. მიკრობზარები წარმოადგენენ დისლოკაციური წარმოშობის გავრცობილი დეფექტების ცენტრებს. მათ არეებში ატომთაშორისი კავშირის გაწყვეტა ქმნის დენის მატარებლების კონცენტრაციის ცვლილებების პირობებს. არ არის გამორიცხული ძლიერ დეფორმირებულ დეფექტებით გამდიდრებულ ზედაპირებზე მიკროფაზების ფორმირება ჟანგბადის და ნახშირბადის ატომების მონაწილეობით. 1,5-2,5ატ.% ინტერვალში გერმანიუმის პროცენტული შემცველობის ცვლილება მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს საცდელი ნიმუშების ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებზე.

ცხრილში 1 წარმოდგენილია p-Si+2ატ.%Ge:B ფუძემრის ელექტროფიზიკური მახასიათებლების დამოკიდებულება მაპოლირებელი ალმასის ნაწილაკების დისპერსულობაზე.

(111) ორიენტაციის p-Si+2ატ.%Ge:B ფუძემრის ელექტროფიზიკური მახასიათებლების დამოკიდებულება მაპოლირებელი ალმასის ნაწილაკების დისპერსულობაზე.

მაპოლირებელი ალმასის ნაწილაკების დისპერსულობა, მკმ	დენის მატარებლების ძვრაძობა, $\text{სმ}^2\cdot\text{ვ}^{-1}\cdot\text{წმ}^{-1}$	დენის მატარებლების კონცენტრაცია სმ^{-3}	კუთრი ელექტროწინაღ ობა, ომი·სმ
0,05	250	$7.37\cdot 10^{15}$	3.39
0,25	220	$8.68\cdot 10^{15}$	3.27
0,5	252	$7.89\cdot 10^{15}$	3.14
1,0	255	$6.84\cdot 10^{15}$	3.62
5,0	242	$7.89\cdot 10^{15}$	3.27

გრეხითი რხევების მილევის ლოგარითმული დეკრემენტისა და სიხშირის რეგისტრაცია განხორციელდა ლაბორატორიულ მექანიკურ რელაქსატორზე, რომელიც დაფუძნებულია შებრუნებულ ქანქარაზე. ქანქარის ვერტიკალურ ღერძზე მექანიკური მომჭერებით ფიქსირდება ღეროს ფორმის საცდელი ნიმუშები ზომებით $0,8\times 0,8\times(25-30)\text{მმ}^3$. გრეხვის პროცესში რხევების ამპლიტუდური დეფორმაციის გამომწვევი ძაბვა არ აღემატება 10^{-5}G , სადაც G წარმოადგენს საცდელი მასალის ძვრის მოდულის აბსოლუტურ მნიშვნელობას. გრეხითი რხევების მილევის პროცესში ენერჯის გაბნევის ინტენსივობა განისაზღვრებოდა ცნობილი ფორმულით [5]:

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi n} \cdot \ln \frac{A_m}{A_{m+n}}$$

სადაც n -არის შესრულებული რხევების რაოდენობა ამპლიტუდის A_m -დან A_{m+n} -მდე შემცირების პროცესში.

ორივე საცდელი ნიმუში ხასიათდება შინაგანი ხახუნის ინტენსივობის არამონოტონური ცვლილებით სხვადასხვა დისპერსულობის ალმასით დამუშავების პირობებში. გერმანიუმის შედარებით მაღალი შემცველობის შენადნობის ფუძემდრეს ახასიათებს შინაგანი ხახუნის ინტენსივობის მაქსიმუმი 0,5 მკმ დისპერსულობის ალმასით დამუშავების შემთხვევაში. მაქსიმუმის პოზიცია წანაცვლებულია მსხვილმარცვლოვანი ალმასით დამუშავების მიმართულებით. გრეხითი რხევების მილევის მაქსიმუმი ხასიათდება გაგანიერებით. მისი არსებობა და, ასევე ინტენსივობის ცვლილება შესაძლებელია დაკავშირებულია SiGe შენადნობის ზედაპირული ფენების სტრუქტურაში რელაქსაციის ცენტრების ფორმირებასთან მექანიკური დამუშავების პროცესში. შინაგანი ხახუნის ინტენსივობის ცვლილება განპირობებულია რელაქსაციის ცენტრების ზომებითა და მათი შემადგენელ კომპონენტებს შორის მანძილების ცვალებადობით. ასეთ ცენტრებს წარმოადგენენ დისლოკაციები, დეკორირებული მინარეების ატომებითა და დისპერსული ფაზებით.

ერთდროულად განისაზღვრებოდა სიხშირის სიდიდეები. ეტალონური ნიმუშისა (ვანადიუმი) და საცდელი ნიმუშების რხევების სიხშირეების განსაზღვრის საფუძველზე გამოთვლილი იქნა ძვრის მოდულის მნიშვნელობები ფორმულით [5]:

$$G = G_o \cdot \frac{f^2}{f_o^2}$$

სადაც- G_o , f_o ეტალონური ვანადიუმის, ხოლო G და f საცდელი ნიმუშების ძვრის მოდულისა და გრეხითი რხევების სიხშირის მნიშვნელობებია.

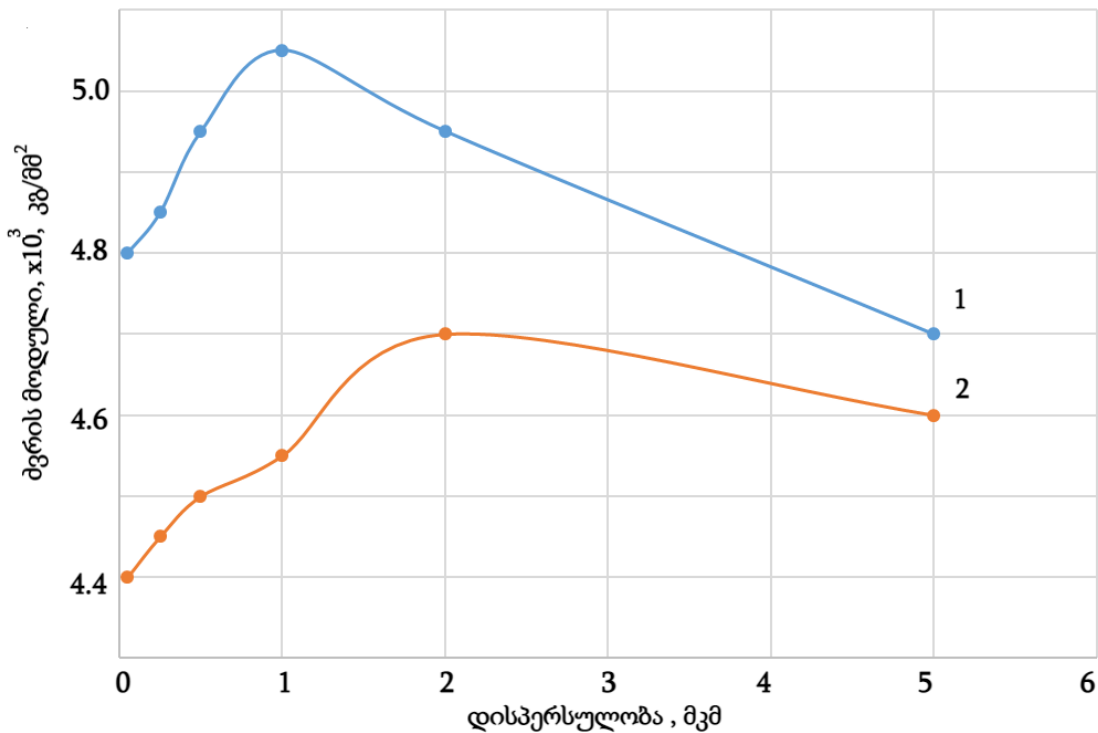
ცხრილი 2-დან ჩანს, რომ ძვრის მოდულის სიდიდეების შემცირებულია გერმანიუმის მაღალი შემცველობის შენადნობში მაპოლირებელი მასალის დისპერსულობის სრულ დიაპაზონში.

SiGe ფუძემრეების დინამიური მექანიკური მახასიათებლების დამოკიდებულება პოლირების ხარისხზე

ცხრილი 2

p-Si+2ატ.%Ge:B			p-Si+2,5ატ.%Ge:B		
ალმასის დისპერსულობა, მკმ	ძვრის მოდული, $\times 10^3$, კგ/მმ ²	შინაგანი ხახუნის ინტენსივობა, $\times 10^4$	ალმასის დისპერსულობა, მკმ	ძვრის მოდული, $\times 10^3$, კგ/მმ ²	შინაგანი ხახუნის ინტენსივობა, $\times 10^4$
0.05	4,80	15	0.05	4.40	17
0.25	4,85	11	0.25	4.45	16
0.5	4,95	7	0.5	4,50	13
1.0	5,05	5	1.0	4,55	10
2.0	4,95	8	2.0	4,70	12
5.0	4,70	10	5.0	4,60	16

ნახ.2-ზე წარმოდგენილია მაპოლირებელი მასალის დისპერსულობის ცვლილების პირობებში ძვრის დინამიური მოდულის ცვლილების ხასიათი.

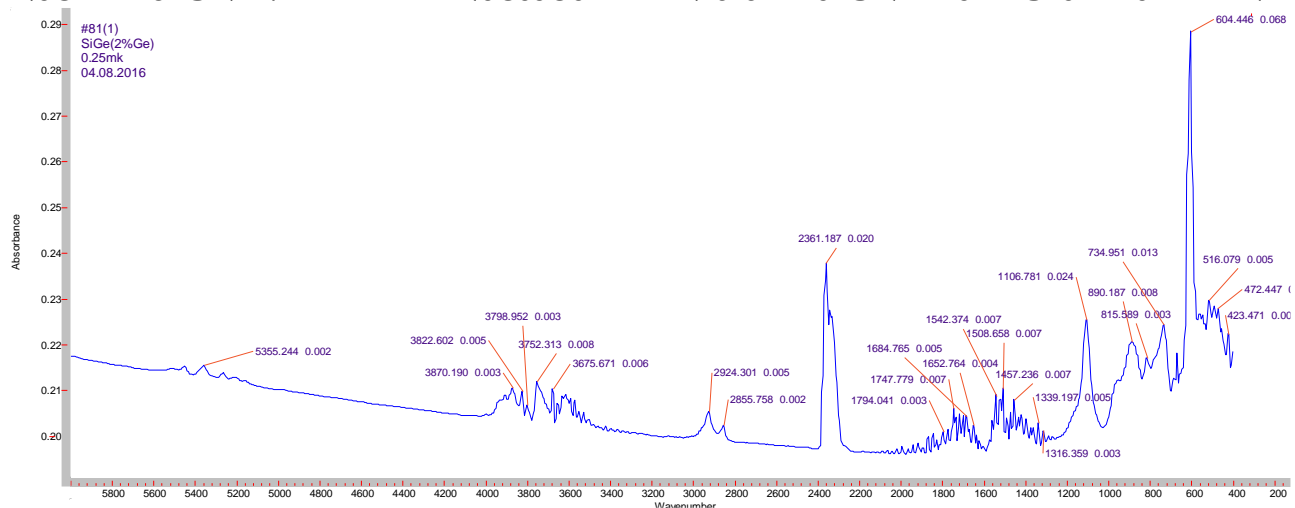


ნახ.2. p-SiGe ფუძემდებლის ძვრის მოდულის დამოკიდებულება მაპოლირებელი ალმასის პასტების დისპერსულობაზე.

1.p-Si+2ატ.%Ge:B 2- p-Si+2,5ატ. %Ge:B

მექანიკური დამუშავებით p-SiGe ნიმუშების ზედაპირებზე წარმოქმნილი სტრუქტურული დეფექტები შესამჩნევად ცვლიან ინფრაწითელი გამოსხივების ოპტიკური შთანთქმის მაქსიმუმების ენერგეტიკულ მდგომარეობებსა და ინტენსივობებს. ცვლილებას განიცდიან ასევე p-SiGe შენადნობის კრისტალურ მესერში გახსნილი ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომების ოპტიკური შთანთქმის მაქსიმუმები.

ნახ.3.-ზე წარმოდგენილია 0,25 მკმ დისპერსულობის ალმასით პოლირებული (111) ორიენტაციის ნიმუშის ოპტიკური შთანთქმის სპექტრი. ის წარმოადგენს მზარდი ფონისა და დეფორმაციული წარმოშობის დეფექტებთან დაკავშირებული მაქსიმუმების ერთობლიობას.



ნახ.3. 0,25 მკმ დისპერსულობის ალმასით პოლირებული (111) ორიენტაციის ფუძემშრის ინფრაწითელი გამოსხივების ოპტიკური შთანთქმის სპექტრი.

სპექტრში მკაფიოდ არიან წარმოდგენილი ჟანგბადის ჩანერგვის პოზიციებში განთავსებული ატომებისა (1107 სმ^{-1}) და ნახშირბადის ჩანაცვლების პოზიციებში გახსნილი ატომების (604 სმ^{-1}) და კრისტალური მესრის რხევებზე მრავალფონონური გაბნევის მაქსიმუმების სიმრავლე ტალღური ვექტორის $800-1100 \text{ სმ}^{-1}$ დიაპაზონში. ალმასის მაპოლირებელი მასალის დისპერსულობის ცვლილებით 0,25-5,0 მკმ ინტერვალში ოპტიკური შთანთქმის მაქსიმუმების პოზიციები და ინტენსივობა არამონოტონურად იცვლება (ცხრილი 1).

ოპტიკური შთანთქმის სპექტრებში მექანიკური პოლირების შედეგად ჩნდება მაქსიმუმი 2360 სმ^{-1} ტალღური ვექტორის მახლობლობაში. აღნიშნული მაქსიმუმი განეკუთვნება CO_2 მოლეკულას [6]. მისი არსებობა p-SiGe შენადნობის ოპტიკური შთანთქმის სპექტრში შესაძლებელია დაკავშირებულია დეფორმაციით გააქტიურებულ ზედაპირზე ატმოსფეროში არსებული CO_2 მოლეკულების აბსორბციით. შესაძლებელია ასევე მისი ფორმირება უშუალოდ მექანიკური პოლირების პროცესში. CO_2 -სთან დაკავშირებული მაქსიმუმი სრულად ჩაიხშობა ქიმიური პოლირებით, რაც მიუთითებს მის წარმოშობაზე ფუძემშრების ზედაპირულ ფენებში გარეშე ფაქტორების ზემოქმედების პირობებში.

p-Si+2ატ.%Ge:B ფუძემშრის მინარევების კონცენტრაციის დამოკიდებულება მაპოლირებელი ალმასის ნაწილაკების დისპერსულობაზე

ცხრილი 1

ალმასის დისპერსულობა, მკმ	ოპტიკური შთანთქმის კოეფიციენტი, სმ^{-1}		
	C	O	CO_2
0,05	6.8×10^{-1}	2.9×10^{-1}	1.38×10^{-1}
0,25	3.13×10^{-1}	1.15×10^{-1}	1.9×10^{-1}
0,5	8.9×10^{-1}	2.3	1.2×10^{-1}
1,0	9×10^{-1}	2.35×10^{-1}	0.46×10^{-1}
5,0	4.7×10^{-1}	1.38×10^{-1}	0.74×10^{-1}

მაპოლირებელ მასალაში ალმასის დისპერსულობის ფართო დიაპაზონში C და O მინარევების შედგენილობის არამონოტონური ცვლილებების ერთ-ერთ მიზეზად შესაძლებელია ვივარაუდოთ აღნიშნული ელემენტების ურთიერთქმედება ვაკანსიური და დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტებთან, რაც ჰქმნის პრეციპიტატებისა და რთული შედგენილობის ვაკანსია-C-O კომპლექსების ფორმირების პირობებს.

ლიტერატურა:

1. В.Д.Вернер, В. Я. Ковязин, Ю. Н. Кузнецов. Внутреннее трение полупроводниковых пластин кремния. Физика и химия обработки Материалов, 1977, #4. Стр.70-75
2. В.П. Алехин, Физика прочности и пластичности поверхностных материалов. М.: Наука, 1983.
- 3.V.V. Kveder, E.A. Steiman, S.A.Shevchenko, H.G. Grimmeiss. Dislocation-related electroluminescence at room temperature in plastically deformed silicon. Phys. Rev. B, 51, 10520 , 1995.
4. Р.И.Баталов, Р.М. Баязитов, В.А. Андреев, Д.И.Крижков, В.С. Кудоярова. Фотолюминесценция в области 1,5 мкм механически обработанных слоев монокристаллического кремния. Физика и техника полупроводников, 2003, том 37, #12. 1427-1430.
- 5.M.S. Blanter, I.S.Golovin, H.Neuhauser, H.-R.Sinning. Internal friction in metallic materials. A handbook. Springer Series in Materials Science. vol. 990, 2007, XVII, 539p.
- 6.IR spectrum table and Chart, <https://www.sigmaldrich.com/GE/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table>

INFLUENCE OF MECHANICAL POLISHING ON THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF MONOCRYSTALLINE p-SiGe SUBSTRATES

I.Kurashvili, T.Melashvili, N.Gogolashvili, G.Chubinidze, M.Kadaria, D.Mkheidze G.Darsavelidze

The effect of mechanical polishing on the structural-sensitive physical properties of the monocrystalline p-SiGe substrates has been investigated. Non-monotonic changes in the electrical characteristics, optical absorption spectra of infrared radiation, internal friction and shear modulus values on the (111) surfaces of SiGe substrates treated with a polishing compound containing different dispersions diamond particles have been shown. Defects formed in the polishing process interact with boron and technological origin oxygen and carbon atoms. Defects of deformation origin are formed in the mechanical processing at room temperature. In the absorption spectra of infrared irradiation a decrease of the concentration of carbon and oxygen atoms and Ci-Cs, Ci-Oi, V-O defects have been revealed.

It is supposed that the non-monotonic changes in the electrophysical and physical-mechanical properties on the (111) surfaces of SiGe substrates are caused by changes in the electrical activity of defects and mechanisms of the dislocation-defect associations interaction, formed in the polishing processes.

Keywords: *alloys, polishing, deformation defect, internal friction, shear modulus, optical absorption spectrum.*