



ელექტრონებით დასხივების გავლენა მონოკრისტალური p-Si+2ატ%Ge შენადნობის ინდენტირებით ინდუცირებული დეფორმაციის მახასიათებლებზე

გიორგი დარსაველიძე, კახაბერი შამათავა, ავთანდილ სიჭინავა, ია ყურაშვილი, მარინა
ქადარია

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა ტექნიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო

აბსტრაქტი.

შესწავლილია 12 მევ ენერჯის ელექტრონებით დასხივებული p-ტიპის მონოკრისტალური Si+2ატ%Ge შენადნობის მიკროინდენტირების მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი ვიკერსის ინდენტორზე მოდებული დატვირთვის 100-1250 მნ დიაპაზონში. საცდელი ნიმუშების (111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის სიბრტყეები ხასიათდებიან დისლოკაციების არაერთგვაროვანი განაწილებითა და სიმკვრივით $1 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^4$ სმ⁻². კრისტალიზაციისა და მექანიკური პოლირების პროცესებში ჩასახული დისლოკაციების სიმრავლეები გავლენას ახდენენ რადიაციული დეფექტების ტიპებსა, კონცენტრაციასა და ურთიერთგარდაქმნის პირობებზე. აღნიშნული, რთული ხასიათის ცვლილებები დეფექტების ქვესისტემაში თავისებურად არიან ასახული სტრუქტურულად-მგრძობიარე მექანიკურ თვისებებში, კერძოდ მიკროსისალესა და დრეკადობის მოდულში. ისინი მკაფიოდ არიან გამოვლენილი ინდენტირების ანაბეჭდების ფორმისა და ზომების, მათთან დაკავშირებული ბზარების ცვლილებებში. ინდენტირებით ინდუცირებული სტრუქტურული ცვლილებების საფუძველზე განისაზღვრა ბზარების წარმოქმნისა და სტრუქტურის რღვევის მახასიათებლები და გაანალიზებულია დისლოკაციური სტრუქტურის, Ge-ს ატომებთან ლოკალიზებული ძაბვებისა და რადიაციული დეფექტების წვლილი საცდელი p-Si+2ატ%Ge შენადნობის დეფორმაციაში.

საკვანძო სიტყვები: SiGe შენადნობი, მიკროსისალე, დრეკადობის მოდული, ელექტრონებით დასხივება, რღვევა, ბზარმედეგობა.

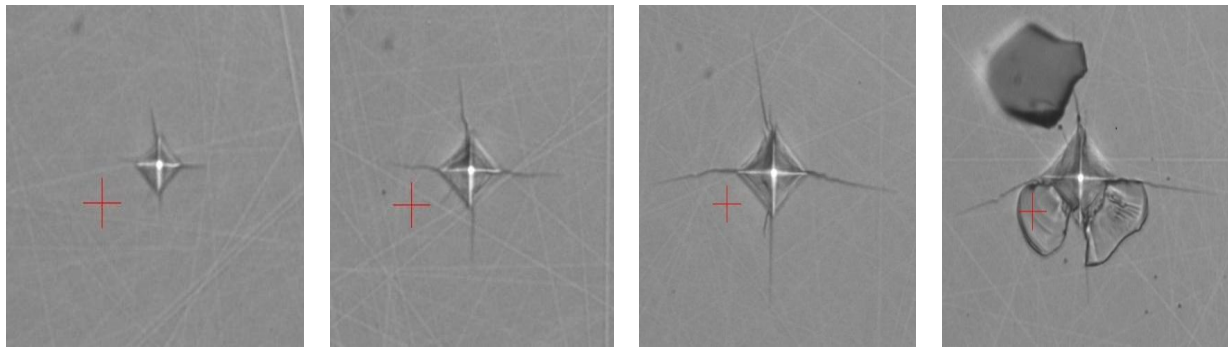
ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული SiGe შენადნობის მოცულობითი კრისტალები ხასიათდებიან დრეკადობის მოდულის წრფივი შემცირებით Ge-ს კონცენტრაციის გაზრდით, რაც დაკავშირებულია მესრის პარამეტრის ზრდასა და, შესაბამისად, ატომთაშორისი კავშირის ძალების შესუსტებასთან [1]. მიუხედავად ამისა, ინდენტირების მეთოდით შეფასება იძლევა საკვლევი Si+2ატ%Ge შენადნობის დრეკადობის მოდულის ამაღლებულ სიდიდეებს როგორც ნიმუშის საწყის, ასევე მაღალი ენერჯის ელექტრონებით დასხივებულ მდგომარეობაში. დრეკადობის მოდულის ანალოგიური ამაღლება ფიქსირებულია Ge-ს ერთი რიგით დაბალი კონცენტრაციის SiGe შენადნობებში [2]. ამავე ნაშრომში შემოთავაზებულია დრეკადობის მოდულის ამაღლების შესაძლებელი მექანიზმი. ინდენტორის დატვირთვის ეტაპზე Si-I ფაზის გარკვეული ნაწილი შესაძლებელია გარდაიქმნას Si-II მეტალურ ფაზად, რომელსაც ახასიათებს დრეკადობის მოდულის მაღალი სიდიდე-304 გპა [3]. აღნიშნული მონაცემების საფუძველზე ნავარაუდევია [2], რომ Ge-ით დოპირება ასტიმულირებს მეტი რაოდენობით, ახალი Si-II ფაზის ფორმირებას.

Ge-ს მაღალი კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად ამცირებს ტექნოლოგიური O მინარევის კონცენტრაციას SiGe შენადნობის კრისტალურ მესერში [4]. შესაბამისად Ge-ს ატომებთან კონცენტრირებული ძაბვების ველში მოსალოდნელია მინარევეებისაგან გაღარიბებული დისლოკაციური სტრუქტურის ფორმირება როგორც მოცულობაში, ასევე დისლოკაციური წარმოშობის ბლოკების გამყოფ საზღვარზე. ასეთ პირობებში მოსალოდნელია მექანიკური მახასიათებლების (დრეკადობის მოდული, მიკროსისალე) შემცირება და ინდენტირებით სტიმულირებული Si-I→Si-II ფაზური გარდაქმნის პროცესთან დაკავშირებული მექანიკური სიმტკიცის გაუმჯობესება [5]. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივების პროცესში დისლოკაციები ეფექტურად მუხრუჭდებიან რადიაციული წერტილოვანი დეფექტებით გამდიდრებულ კოტრელის ატმოსფეროში, რასაც შეუძლია ასევე მასალის მექანიკური განმტკიცება [6].

ნაშრომში წარმოდგენილია საწყისი და მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებულ მდგომარეობაში ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული მონოკრისტალური P-ტიპის SiGe შენადნობის ორმხრივ პოლირებული ფუძემრეების ბზარმედეგობის შესწავლის შედეგები.

(111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის სიბრტყეებზე მეტალოგრაფიული კვლევა განხორციელდა ოპტიკურ მიკროსკოპზე NMM-80RF/TRF, ხოლო ელექტროფიზიკური მახასიათებლები (კუთრი ელექტროწინალობა, ხვრელების კონცენტრაცია, ძვრადობა) განისაზღვრა ჰოლის ეფექტის გაზომვით ვან დერ პაუს მეთოდით Ecopia HMS-3000 დანადგარზე. ინდენტირების ფიზიკური მახასიათებლები (მიკროსისალე, დრეკადობის მოდული, ანაბეჭდების ზომები და ფორმა) შესწავლილი იქნა ვიკერსის მეთოდით შიმამუს სისტემის DUH-211S ტესტერზე. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით 12 მევ დასხივება განხორციელდა Varian-ის სისტემის clinac-2100 iX დანადგარზე. დასხივების ფლუენსი - $8 \cdot 10^{13}$ სმ⁻².

საწყის მდგომარეობაში საკვლევი ნიმუშის კუთრი ელექტროწინაღობა 10ომი.სმ-ია შესაბამისად, დენის მატარებლების კონცენტრაცია $\sim 10^{15}$ სმ⁻³ რიგისაა და ის ატომთაშორისი კავშირის ძალებზე უმნიშვნელო გავლენას ახდენს. მათზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დიდი ატომური რადიუსის გერმანიუმით ლეგირება 2ატ%-მდე. ასეთ პირობებში სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობის კრისტალურ მესერში ფორმირდება მაღალი ინტენსივობის, ურთიერთზედებული დეფორმაციის ველები და სტრუქტურაში წარმოიქმნება სხვადასხვა ზომის ბლოკებით შედგენილი უჯრედოვანი დისლოკაციური სტრუქტურა. ბლოკები ხასიათდებიან გერმანიუმის განსხვავებული კონცენტრაციითა და დისლოკაციების მაღალი სიმკვრივით ბლოკების გამყოფ საზღვრებზე. საცდელი ნიმუშების (111) ორიენტაციის სიბრტყეებზე არათანაბრად განაწილებული დისლოკაციების სიმკვრივე იცვლება $1 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^4$ სმ⁻² საზღვრებში.



ა)

ბ)

გ)

დ)

(ნახ. 1) Si+2ატ%Ge შენადნობის (111) ორიენტაციის ნიმუშის ინდენტირების ინდენტირების ანაბეჭდების ოპტიკური მიკროფოტოგრაფიები ვიკერსის ინდენტორზე სხვადასხვა მაქსიმალურ დატვირთვაზე:

ა)250 მნ, ბ)500 მნ, გ)1000 მნ, დ)1250 მნ.

მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივების პროცესში წარმოიქმნება წერტილოვანი რადიაციული დეფექტების, ვაკანსია-ჩანერგილი Si(Ge) ატომების ე.წ. ფრენკლის წყვილები. მათი თერმული მდგრადობა ოთახის ტემპერატურაზე მინიმალურია, რის გამო მაღლდება ტექნოლოგიურ მინარევებთან (O,C) კომპლექსების წარმოქმნის ალბათობა. პირველადი რადიაციული დეფექტების არსებობის ხანგრძლივობასა და კომპლექსებში გაერთიანებას არეგულირებენ დიდი ატომური რადიუსის Ge-ს ატომებთან SiGe-ს კრისტალურ მესერში კონცენტრირებული ძაბვები. ამავე დროს იცვლება სტრუქტურაში ელექტრონებით დასხივებამდე არსებული დისლოკაციების მოძრაობის დამამუხრუჭებელი ატმოსფეროების კონცენტრაცია, დისლოკაციებზე სტატისტიკურად განაწილებული მერხვეი სეგმენტების ძვრადობა და მიკროპლასტიკური დეფორმაციის განვითარების შესაძლებლობები. აღნიშნული ფაქტორების რეალიზაცია წარმოქმნის საცდელი SiGe შენადნობის მაღალ მაქსიმალურ დატვირთვებზე ინდენტირების პროცესებში დრეკადი და პლასტიკური დეფორმაციისა და ზხარების ფორმირების ახალ პირობებს, რაც შესაძლებელია დადგინდეს

მაღალ დატვირთვებზე ინდენტორების აღდგენილი ანაბეჭდების ცვლილებათა კანონზომიერების შესწავლით.

(ნახ.1)-ზე წარმოდგენილია Si+2ატ%Ge შენადნობის პოლირებული ფირფიტის (111) ორიენტაციის ზედაპირზე ინდენტორის სხვადასხვა სიდიდის მაქსიმალური დატვირთვით სტიმულირებული აღდგენილი ანაბეჭდების გამოსახულებები.

Si+2ატ%Ge შენადნობის საცდელი ნიმუშის ინდენტორების დაბალ მაქსიმალურ დატვირთვებზე, ნარჩენი ანაბეჭდების კუთხეებთან შეინიშნება მხოლოდ წრფივი რადიალური ბზარები. მაღალ მაქსიმალურ დატვირთვებზე რადიალური ბზარების სიგრძე იზრდება, ზოგჯერ შეინიშნება მათი გავრცელების ძირითადი მიმართულებიდან გადახრა, აგრეთვე ბზარის ნაკვალევზე ღუნვებისა და საფეხურების წარმოქმნა. მაღალ დატვირთვებზე ანაბეჭდების ზონაში იზრდება მცირე ზომის ნამსხვრევების რაოდენობა. მაღალი ელექტრონებით დასხივებულ მდგომარეობაში ფიქსირებულია აგრეთვე პლასტიკური და რღვევის დეფორმაციების ბზარების ნაკვალევის რთული რელიეფი. ინდენტორზე მოდებული მაღალი მაქსიმალური დატვირთვები ანვითარებენ ინტენსიურ გარეშე ძაბვებს, რომლებიც ქარბია Ge-ს ატომებსა და რადიაციულ დეფექტებთან ლოკალიზებულ ძაბვებზე. ძირითადად მაღალი ინტენსივობის გარეშე ძაბვები აკონტროლებენ პლასტიკურ-მყიფე დეფორმაციის რთულ პროცესებს, რომლებშიაც უმნიშვნელოა ელექტრონების რადიაციისა და Ge-ით ლეგირების გავლენა.

რადიალური ბზარების სიგრძის, დრეკადობის მოდულისა და მიკროსისალის გაზომვების საფუძველზე შეფასებულ იქნა ბლანტი რღვევის კოეფიციენტი (ბზარწარმოქმნისადმი მედეგობა) K_{ic} და γ - რღვევის ეფექტური ენერგია

$$K_{ic} = 0.0116 \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{L^{3/2}}, \quad \gamma = \frac{K_{ic}^2}{2E}$$

სადაც E - დრეკადობის მოდულია, H - მიკროსისალე, L - ბზარის სიგრძე.

ცხრ. 1-ში წარმოდგენილია p- Si+2ატ%Ge შენადნობის ინდენტორების პროცესებში მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი.

ცხრილი.1

ინდენტორზე დატვირთვა, მნ	ნიმუში, Si+2ატ%Ge	დრეკადობის მოდული, გპა	მიკროსისალე, გპა	ზხარის სიგრძე, მკმ	ბლანტი რღვევის კოეფიციენტი მპა,მ ^{1/2}	რღვევის ეფექტური ენერგია, პა.მ.
100	საწყისი a	187.1	9.3	3	1.379	5.08
	ელ. დასხივებული b	212.9	9.91	3	1.427	4.78
250	საწყისი a	185.8	9.07	6	1.231	4.08
	ელ. დასხივებული b	199.5	9.67	5.75	1.236	3.83
500	საწყისი a	168.6	8.4	10	1.133	3.80
	ელ. დასხივებული b	188.1	8.87	10	1.210	3.89
750	საწყისი a	-	-	-	-	-
	ელ. დასხივებული b	176.5	8.32	13.25	1.143	3.70
1000	საწყისი a	164.5	8.35	18	0.934	2.65
	ელ. დასხივებული b	170.0	8.02	18	0.961	2.72
1250	საწყისი a	162.7	7.83	21.5	0.913	2.56
	ელ. დასხივებული b	168.0	7.68	22	0.906	2.44

a – საწყისი მდგომარეობა, b – ელექტრონებით დასხივებული

Si+2ატ%Ge ნიმუშების მაღალ დატვირთვებზე ინდენტორების ანაბეჭდებზე ფიქსირებული ზხარების ზიგზაგისებური ფორმა განპირობებულია მაღალი ინტენსივობის პლასტიკური და მყიფე რღვევის დეფორმაციით კრისტალის მოცულობაში. ძაბვების სივრცული განაწილების სპეციფიკურ შემთხვევებში ზხარი გავრცელების პროცესში შესაძლებელია გადაიხაროს მაქსიმალური გაჭიმვის ძაბვების სიბრტყიდან და გავრცელდეს რღვევისადმი დაბალი წინააღმდეგობის სიბრტყეზე. ცნობილია [7], რომ ზხარი შესაძლებელია გავრცელდეს მაღალი კრისტალოგრაფიული ინდექსებიან სიბრტყეზე. ამავე ნაშრომის ავტორთა მოსაზრებით თუ

ვიკერსის ინდენტორის დიაგონალი მიმართული იქნება (001) ან (110) ორიენტაციით, მაშინ ბზარი შესაძლებელია გავრცელდეს (110) სიბრტყეზე და წარმოქმნას $a/3 \langle 111 \rangle$ დისლოკაციური მარყუჟები.

ექსპერიმენტულმა გაზომვებმა აჩვენეს $\sim 8^{13} \text{სმ}^{-2}$ ფლუენსის მაღალენერგეტიკული ელექტრონების დასხივებული P-ტიპის Si+2ატ%Ge შენადნობის დრეკადობის მოდულისა და მიკროსისალის სუსტი მატება ვიკერსის ინდენტორზე მოდებული მაქსიმალური დატვირთვის 100-1250 მნ დიაპაზონში. საწყისი და ელექტრონებით დასხივებული Si+2ატ%Ge შენადნობის ინდენტორების დრეკადობის მოდულისა და მიკროსისალის შედარებითი მეტად ამალლება განპირობებულია ინდენტორების პროცესში გაზრდილი რაოდენობით მეტალური Si-II ფაზის ფორმირებით ინდენტორის წვეროსა და მატრიცის გამყოფ საზღვარზე. მაღალი მექანიკური თვისებების მეტალური Si-II ფაზის გავლენა შენადნობის სტრუქტურულად-მგრძობიარე ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე მნიშვნელოვნად მცირდება ინდენტორზე მოდებული მაღალი დატვირთვის პირობებში, როდესაც მიმდინარეობს ნიმუშის მოცულობაში ინტენსიური პლასტიკური და მყიფე რღვევის პროცესები.

Ge-ით ლეგირებული Si-ის დრეკადობის მოდული და მიკროსისალე n-Si-თან შედარებით მაღალი სიდიდებით ხასიათდებიან, რაც განპირობებულია ინდენტორების პროცესებში გაზრდილი რაოდენობით მაღალი სიმტკიცის β -კალის მოდიფიკაციის SiGe-II ფაზის წარმოქმნით. საცდელ P-SiGe შენადნობში მცირდება ბზარების წარმოქმნისადმი მედეგობა. ასეთ მდგომარეობაში მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება სუსტად ზრდის ბლანტი რღვევის კოეფიციენტისა და რღვევის ეფექტური ენერჯის მნიშვნელობებს.

ლიტერატურა

1. F.Schaffler. Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, JnN, SiC, SiGe. John Wiley and Sons, New York, 2001
2. Z.Zeng, L.Wang, X.Ma, Sh.Qu, J.Chen, Y.Liu, D.Yang. J.Scripta Materiala, 64, (2011), 832-835
3. T.Kiriyama, H.Harada, J.W.Yan. J.Semiconductor Science Technology, 24, (2009), 025014.
4. L.I.Khirunenko, Yu.V.Pomozov, M.G.Sosnin, V.K.Shinkarenko, Oxygen in silicon doped with isovalent impurities, J.Physica B: Condensed Matter, Vol.273-274, (1999), p.317-321.
5. I.Yonenaga, T.Taishi, X.Huang, and K.Hoshikaura, Dynamic characteristics of dislocations in Ge-doped and (Ge+B) codoped silicon, J.Appl. Phys. 93, Issue 1, (2003), p.265-269.
6. N.A.Sobolev, Radiation effects in Si-Ge quantum size structure (Review), J.Semiconductors 47, (2013), p.217-227.
7. F.Ebrahimi, L.Kalwani, J.Materials Science and Engineering, A268, (1999), 116-126.

Effect of electron irradiation on monocrystalline p-Si+2at%Ge alloy on the characteristics of indentation-induced deformation

Giorgi Darsavelidze, Kakhaberi Shamatava, Avtandil Sichinava, Ia Kurashvili, Marina Kalaria,

Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology

Abstract. The regularities of changes in the microindentation characteristics of the p-type monocrystalline Si+2at%Ge alloy irradiated with 12 MeV electrons in the range of 100-1250 mN of the load applied to the Vickers indenter have been studied. The (111) crystallographic orientation planes of the test samples are characterized by a non-uniform distribution of dislocations and a density of $1 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^4$ cm⁻². The abundances of dislocations embedded in the crystallization and mechanical polishing processes affect the types, concentrations, and interconversion conditions of radiation defects. The above-mentioned complex changes in the defects subsystem are reflected in structural sensitive mechanical properties, in particular in the micro-hardness and the modulus of elasticity. They are clearly identified in the changes in the shape and size of the indentation prints and the cracks associated with them. Based on the mentioned structural changes, the characteristics of indentation-induced crack formation and structure fracture were determined, and the contribution of the dislocation structure, localized stresses near Ge atoms, and radiation defects to the indentation-induced deformation of the experimental p-Si+2at%Ge alloy was analyzed.

Key words: SiGe alloy, microhardness, modulus of elasticity, electron irradiation, rupture, cracking.