



მაღალი ენერგიის ელექტრონებით დასხივების გავლენა Si-ისა და Si+2ატ%Ge შენადნობის ფუძემრეების ბლანტი მსხვრევის მახასიათებლებზე

გიორგი დარსაველიძე, კახაბერ შამათავა, ავთანდილ სიჭინავა, ია ყურაშვილი, მარინა ქადარია
¹სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი,
²სოხუმის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

სილიციუმის ფუძის ნახევარგამტარულ მასალებში ბზარების წარმოქმნისადმი მედეგობის კვლევა მეტად მნიშვნელოვანია მიკროელექტრომექანიკური სისტემების ტექნოლოგიების დამუშავებაში. მიუხედავად ამისა დღეისათვის არსებობს მწირი ინფორმაცია ნახევარგამტარული მასალების ინდენტირების პროცესებში ბზარების წარმოქმნა-გავრცელებისა და რღვევის დეფორმაციის მექანიზმების შესახებ.

ნაშრომში წარმოდგენილია ვიკერსის ინდენტორზე მოდებული მაქსიმალური დატვირთვის ფართო დიაპაზონში საწყისი და 12 მევ ენერგიის ელექტრონებით დასხივებული მონოკრისტალური n-Si (100), p-Si (111) და p-Si+2ატ.%Ge (111) ნიმუშების დრეკადობის მოდულის, მიკროსისალისა და ბზარ-წარმოქმნის მახასიათებლების კვლევის შედეგები. გაზომვები სრულდებოდა ვიკერსის მეთოდით Shimadzu DUH-211S სისტემის ულტრამიკროტესტერზე ოთახის ტემპერატურის პირობებში.

ნაჩვენებია, რომ საწყის მდგომარეობაში (111) ორიენტაციის p-Si ფუძემრეები ხასიათდებიან შედარებით მაღალი დრეკადობის მოდულითა და მიკროსისალით. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება იწვევს სამივე ნიმუშის მექანიკური მახასიათებლების ამაღლებას, რაც მეტად არის გამოსახული p-ტიპის მონოკრისტალურ სილიციუმში.

ინდენტირების ანაბეჭდების დიაგნოზის გასწვრივ გავრცელებული ბზარების სიგრძის განსაზღვრის საფუძველზე შეფასებულია ნიმუშის ზედაპირზე ბზარების წარმოქმნის კრიტიკული ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი (ბლანტი რღვევის კოეფიციენტი ანუ ბზარმედეგობა) და რღვევის ეფექტური ენერგია.

ბლანტი რღვევისადმი მაღალი მედეგობა ახასიათებს p-Si -ის ფუძემრეებს (111) სიბრტყეებზე. ელექტრონებით დასხივება აუმჯობესებს p-Si -ის ბლანტი რღვევის მახასიათებლებს. p-Si+2ატ.%Ge შენადნობის (111) ორიენტაციის ფუძემრეების ბზარმედეგობა ხასიათდება უმნიშვნელო ზრდით ელექტრონებით დასხივებულ მდგომარეობაში. ინდენტირების

პროცესებში p-Si+2ატ.%Ge შენადნობის მექანიკურ თვისებებს, მათ შორის ბლანტი მსხვრევის მახასიათებლებს განსაზღვრავს ორი ურთიერთსაპირისპირო ფაქტორი: დარბილება, დაკავშირებული დიდი ატომური რადიუსის გერმანიუმის ატომებთან და განმტკიცება, დაკავშირებული ინდენტირებით სტიმულირებული ფაზური გარდაქმნის პროცესში მეტი რაოდენობით მაღალი სიმტკიცის β-კალის მოდიფიკაციის SiGe- II ფაზის წარმოქმნასთან.

საკვანძო სიტყვები: მონოკრისტალური Si, SiGe შენადნობი, ინდენტირება, ბლანტი მსხვრევა, მიკროსისალე, დრეკადობის მოდული, ელექტრონებით დასხივება.

მექანიკური დატვირთვების პროცესებში ნახევარგამტარული მასალების სტრუქტურის რღვევის მექანიზმების კვლევას ენიჭება დიდი მნიშვნელობა მათზე მაღალეფექტური საიმედო, დიდი ინტეგრალური სქემებისა და მიკრო-და ნანო ელექტრომექანიკური MEMS და NEMS სისტემების შესაქმნელად. ნახევარგამტარული ხელსაწყოების ოპტიმიზაციისა და დეფექტების მართვისათვის აუცილებელია მათი ფუძემდებლების ზედაპირებზე მექანიკური კონტაქტით ინიცირებული რღვევის პროცესების მიზეზების დადგენა.

ცნობილია [1,2], რომ განსაზღვრულ პირობებში ინდენტირებით ფორმირებული რადიალურ-მედიანური და გვერდითი ბზარები აღდგენით პროცესებში განიცდიან დრეკადი ძაბვების ველის ზემოქმედებას. ანაბეჭდებთან ფორმირებული სხვადასხვა წარმოშობის ბზარებისა და მათი განშტოებების სიგრძის პროპორციული რღვევის სიბლანტე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მასალების მექანიკურ სიმტკიცეზე.

რადიალური ბზარის სიგრძის ათვლას აწარმოებენ ანაბეჭდის ცენტრიდან, ხოლო ინდენტირების მოდულისა და მიკროსისალის შეფარდებას საზღვრავენ ოლივერ-ფარის მეთოდით [3]. მათი გამოყენებით განისაზღვრება ბზარის წვეროსთან კრიტიკული ძაბვის ინტენსივობის ფაქტორი [4,5]:

$$K_{Ic} = K \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{C^{3/2}}\right),$$

სადაც, კოეფიციენტი $K=0.16$ ვიკერსის ინდენტორის გამოყენების შემთხვევებში [6].

C წარმოადგენს ბზარის სიგრძეს, P დატვირთვას ინდენტორზე, ხოლო E/H არის მოდულის შეფარდება მიკროსისალესთან.

ბზარის მამოძრავებელი კრიტიკული ძალა ანუ რღვევის ენერგია განისაზღვრება ფორმულით [4]:

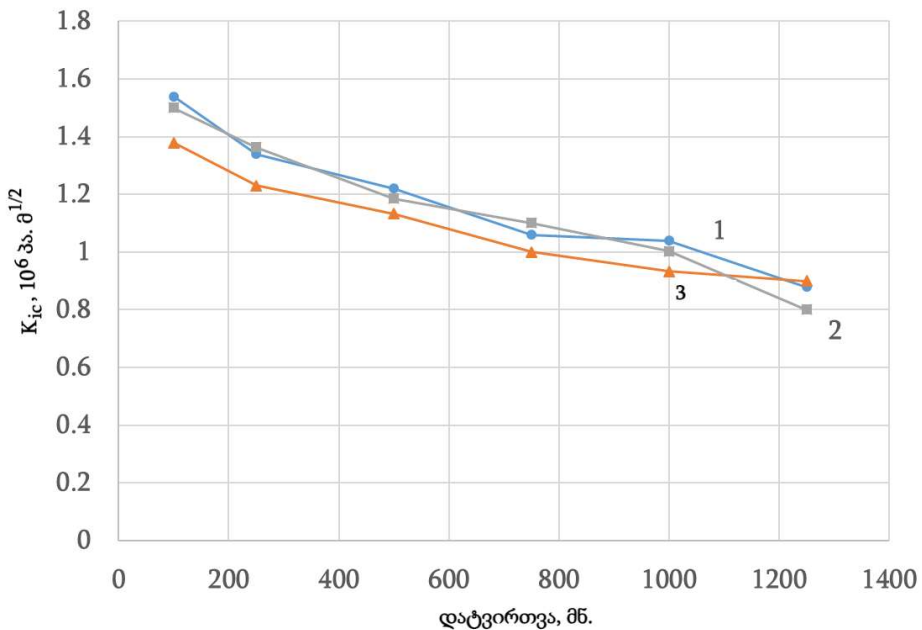
$$\gamma = \frac{K_{Ic}^2}{2E}.$$

კოეფიციენტი K_{Ic} ასახავს სისალის რღვევის სიბლანტეს ანუ ბზარმედეგობას. მისი სიდიდე დამოკიდებულია ნარჩენი ანაბეჭდის ირგვლივ არსებული ძაბვების განაწილებაზე.

მეფე მასალების, კერძოდ ნახევარგამტარების, ინდენტირების პროცესების მახასიათებელი მექანიკური ძაბვების ინტენსივობისა და სივრცულ განაწილებაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ატომთაშორისი კავშირების რღვევის, სტრუქტურული დეფექტების წარმოქმნისა და მოძრაობის, აგრეთვე სტრუქტურულ-ფაზური გარდაქმნის პროცესები გარეშე მექანიკური, თერმული და რადიაციული ზემოქმედების პირობებში. ლეგირებული მასალის სტრუქტურაში ჰეტეროგენურად განაწილებული დეფორმაციის არეები და კონცენტრაციის

გრადიენტები დიდ როლს ასრულებენ ბზარების წარმოქმნისა და გავრცელების, ასევე მასის გადატანის პროცესებში მოცულობიდან ზედაპირის მიმართულებით.

ნაშრომში წარმოდგენილია მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებული მონოკრისტალური სილიციუმისა და SiGe შენადნობის ორმხრივ პოლირებული ფუძემრეების ბზარმდეგობის შესწავლის შედეგები. ორივე საკვლევი ნიმუშის კუთრი ელექტროწინაღობა 5-10ომი.სმ-ია შესაბამისად, დენის მატარებლების კონცენტრაცია 10^{14} - 10^{15} სმ⁻³ რიგისაა და ის ატომთაშორისი კავშირის ძალებზე უმნიშვნელო გავლენას ახდენს. ბზარმდეგობაზე შესაძლებელია მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინოს დიდი ატომური რადიუსის გერმანიუმით ლეგირებამ 2ატ%-მდე. ასეთ პირობებში სილიციუმის 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. SiGe შენადნობის სტრუქტურაში ელექტრონებით რადიაციას შეაქვს სხვადასხვა ძვრადობის პირველადი რადიაციული დეფექტები. ისინი ოთახის ტემპერატურის პირობებში ინტენსიურად მოქმედებენ ერთიმეორესთან და მატრიცაში დასხივებამდე არსებულ დეფექტებთან. მათ ურთიერთქმედებას დისლოკაციურ სტრუქტურასთან შეუძლია მნიშვნელოვნად შეცვალოს მექანიკური თვისებები და ინდენტირების პროცესში დეფორმაციის განვითარების პირობები.



ნახ.1 საწყისი ნიმუშების ბზარმდეგობის დამოკიდებულება ინდენტორზე მოდებულ მაქსიმალურ დატვირთვაზე.

- 1. p-Si, (111) 2. n-Si, (100) 3. P-Si+2ატ%Ge, (111)

ნახ.1-ზე წარმოდგენილია საკვლევი Si და SiGe ნიმუშების ინდენტირების პროცესებში ბლანტი რღვევის კოეფიციენტის ცვლილებები ინდენტორზე მოდებულ მაქსიმალური

დატვირთვის 100-1250 მნ დიაპაზონში. ნახ.1-დან ჩანს, რომ მინიმალურ დატვირთვებზე ელექტრონებით დასხივება იწვევს n-Si-ის ბზარმდეგობის გაუმჯობესებას. ინდენტორზე მოდებული მაქსიმალური დატვირთვის გაზრდა იწვევს საწყისი და ელექტრონებით დასხივებული n-Si-ის ბზარმდეგობის შემცირებას. მაღალ დატვირთვებზე ინდენტორების პროცესებში ვლინდება სხვადასხვა ორიენტაციის ბზარების წარმოქმნა და გავრცელება ნიმუშის ზედაპირზე და მოცულობაში. მაღალენერგეტიკული ელექტრონების დასხივებით ფორმირებული რადიაციული დეფექტები მონაწილეობენ დისლოკაციების ბლოკირებაში, რის გამო მოსალოდნელია პლასტიკურობის წვლილის შემცირება ინდენტორებით ინდუცირებული დეფორმაციის პროცესებში.

ინდენტორზე მოდებულ მაღალ მაქსიმალურ დატვირთვებზე საწყისი და ელექტრონებით დასხივებული n-Si-ის ნიმუშის სტრუქტურის რღვევა პრაქტიკულად ერთნაირ პირობებში მიმდინარეობს. კერძოდ ერთდროულად ინტენსიურად მიმდინარეობს რადიალური, მედიანური და სხვადასხვა მიმართულების მოცულობითი ბზარების ფორმირება და გაფართოება ენერგეტიკულად ხელსაყრელი კრისტალოგრაფიული მიმართულებებით. ეს გარემოება გრაფიკებზე ასახულია ბზარმდეგობის დაახლოებით ერთნაირი კანონზომიერებით შემცირებაში ინდენტორზე მოდებული მაღალი მაქსიმალური დატვირთვების დიაპაზონში. აღნიშნულ პირობებში იზრდება ბზარმდეგობის განსაზღვრის ცდომილება, რაც დაკავშირებულია ინდენტორების ანაბეჭდებზე ფიქსირებული ბზარების ნაკვალევის გავრცელების წრფივი კანონზომიერებისაგან გადახრით. სხვადასხვა ორიენტაციის მაღალი ინტენსივობის ძაბვების ურთიერთქმედება განაპირობებს ბზარების ნაკვალევის გავრცელების გადახრებს წრფივი კანონზომიერებიდან.

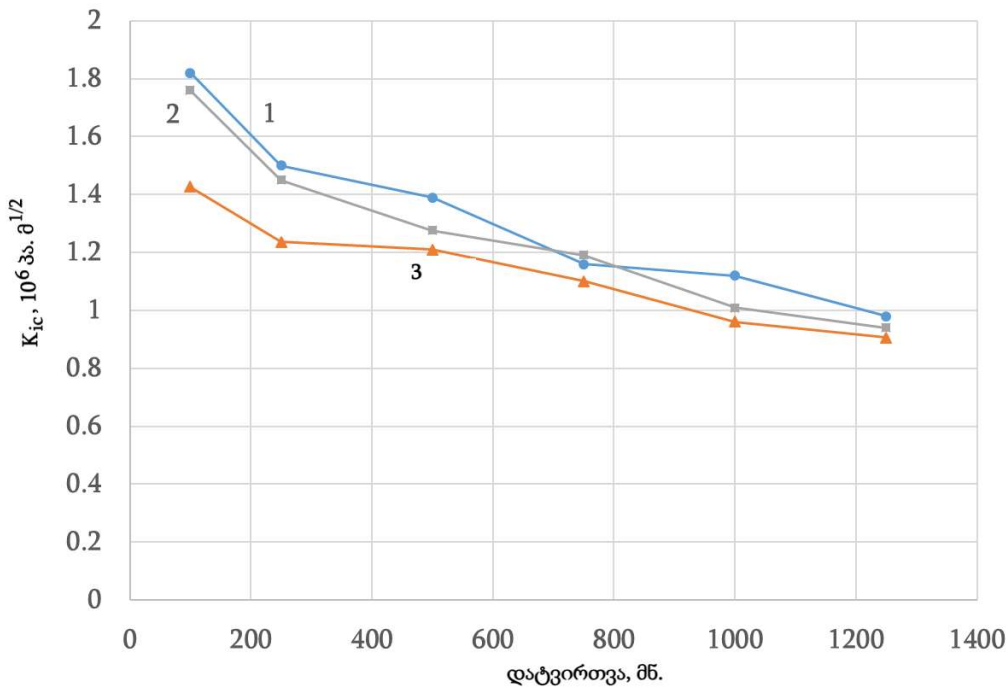
Si+2ატ%Ge შენადნობის საცდელი ნიმუშის ბზარმდეგობა შედარებით სწრაფად მცირდება ინდენტორების დაბალ მაქსიმალურ დატვირთვებზე, როდესაც ნარჩენი ანაბეჭდების კუთხეებთან შეინიშნება მხოლოდ წრფივი რადიალური ბზარები. მაღალ მაქსიმალურ დატვირთვებზე რადიალური ბზარების სიგრძე იზრდება, ზოგჯერ შეინიშნება მათი გავრცელების ძირითადი მიმართულებიდან გადახრა, აგრეთვე ბზარის ნაკვალევზე ღუნვებისა და საფეხურების წარმოქმნა. მაღალ დატვირთვებზე ანაბეჭდების ზონაში იზრდება მცირე ზომის ნამსხვრევების რაოდენობა. მაღალი ენერგიის ელექტრონებით დასხივებულ მდგომარეობაში ფიქსირებულია აგრეთვე პლასტიკური და რღვევის დეფორმაციების ბზარების ნაკვალევის რთული რელიეფი.

Si-სა და SiGe შენადნობის ბზარმდეგობათა დაახლოებით ერთნაირი კანონზომიერების ცვლილებები ასახავენ გარეშე და შინაგანი ძაბვების გავლენას მაღალ დატვირთვებზე ინდენტორებით ინდუცირებულ რთულ დეფორმაციულ პროცესებში.

საკვლევი Si და Si+2ატ%Ge ნიმუშების მაღალ დატვირთვებზე ინდენტორების ანაბეჭდებზე ფიქსირებული ბზარების ზიგზაგისებური ფორმა განპირობებულია მაღალი ინტენსივობის პლასტიკური და მყიფე რღვევის დეფორმაციით კრისტალის მოცულობაში. ძაბვების სივრცული განაწილების სპეციფიკურ შემთხვევებში ბზარი გავრცელების პროცესში შესაძლებელია გადაიხაროს მაქსიმალური გაჭიმვის ძაბვების სიბრტყიდან და გავრცელდეს რღვევისადმი დაბალი წინააღმდეგობის სიბრტყეზე. ცნობილია [7], რომ ბზარი 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 $\sim 10^{14} \text{სმ}^{-2}$ ფლუენსის მაღალენერგეტიკული ელექტრონების დასხივებული n-Si და 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 ამაღლება 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-მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე მნიშვნელოვნად მცირდება ინდენტორზე მოდებული მაღალი დატვირთვის პირობებში, როდესაც მიმდინარეობს ნიმუშის მოცულობაში ინტენსიური პლასტიკური და მყიფე რღვევის პროცესები.



ნახ.2 მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებული ნიმუშების ბზარმდეგობის დამოკიდებულება ინდენტორზე მოდებულ მაქსიმალურ დატვირთვაზე.

1. p-Si, (111) 2. n-Si, (100) 3. P-Si+2ატ%Ge, (111)

Ge-ით ლეგირებული Si-ის დრეკადობის მოდული და მიკროსისალე n-Si-თან შედარებით მაღალი სიდიდებით ხასიათდებიან, რაც განპირობებულია ინდენტორების პროცესებში წარმოქმნილ ფაზათა ნარევი მაღალი სიმტკიცის β-კალის მოდიფიკაციის SiGe-II ფაზის მასის ზრდით. n-Si-თან შედარებით SiGe შენადნობში მცირდება ბზარების წარმოქმნისადმი

მედეგობა. ასეთ მდგომარეობაში მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება სუსტად ზრდის ბლანტი რღვევის კოეფიციენტისა და რღვევის ეფექტური ენერჯის მნიშვნელობებს. P-Si-ის (111) სიბრტყეებზე მაღალია დრეკადობის მოდულისა და მიკროსისალის სიდიდეები ინდენტორზე მოდებული დატვირთვის 100-1250 მნ დიაპაზონში. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება შესამჩნევად ამაღლებს მექანიკური თვისებების მახასიათებლებს. იზრდება ასევე ბზარების წარმოქმნისადმი მედეგობა. შესაძლებელია ელექტრონებით დასხივების პროცესში რადიაციული დეფექტები მონაწილეობენ ინდენტორ-ნიმუშის გამყოფი საზღვრის ზონაში დრეკადი ძაბვების რელაქსაციაში დისლოკაციური პლასტიკური დეფორმაციის მექანიზმით. ასეთ პირობებში ენერგეტიკულად გამწვანებულია მყიფე მსხვრევის დეფორმაცია და მეტი ენერჯია უნდა დაიხარჯოს განსაზღვრული ტიპის ბზარების ჩასახვისა და გავრცელებისათვის ნიმუშის ზედაპირზე და მოცულობაში.

ლიტერატურა

1. D.B. Marshall, B.R. Lawn and A.G.Evans J.Am.Ceram Soc., 63,(1982), 561-566
2. R.F, Cook and G.M. Pharr. J.Am.Ceram. Soc., 73, (1990), 787-817
3. W.C. Oliver and G.M. Pharr, J.Mater. Res, 7 (1192), 1567.
4. B.R. Lawn, A.G. Evans and D.B. Marshall. J. Am. Ceram Soc., 63, (1982), 1769-
5. J.S. Field, M.V. Swain, R.D. Dukino. J. Mater. Res., vol.18, N6 (2003), 1412-1419.
6. GR. Anstis, P. Chantikul, Lawn B.R, et al. J. Am. Ceram. Soc., (1981), 533-538.
7. F. Ebrahimi,L. Kalwani, J. Materials Science and Engineering, A268, (1999), 116-126.

Effect of highenergetic electrons irradiation on the fracture toughness characteristics of Si and Si+2at.%Ge wafers

Giorgi Darsavelidze, Kakhaber Shamatava, Avtandil Sichinava, Ia Kurashvili, Marina Kadaria

¹Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology,

²Sokhumi State University

Abstract

Crack resistance of silicon based materials wafers have a vital meaning in development of microelectromechanical systems technology. Nevertheless, there is currently little information about the mechanisms of crack formation, propagation and rupture deformation in the processes of indentation of semiconductor materials.

Present paper deals with the investigation of elastic modulus, microhardness and crack-formation characteristics of the monocrystalline n-Si (100), p-Si (111) and p-Si+2at.%Ge wafers in the initial and 12 MeV energy electrons irradiated states, over a wide range of maximum applied load on the Vickers indenter. Measurements were performed by the Vickers method on Shimadzu DUH-211S system ultramicrotester at room temperature.

It is shown that in the initial state (111) orientation p-Si substrates are characterized by relatively high elastic modulus and microhardness. Irradiation with high-energy electrons leads to an farther increase in the mechanical characteristics of all three samples, which is more expressed in p-type monocrystalline silicon.

Based on the evaluation of the length of the cracks propagated along the diagonals of the residual impressions, the critical stress intensity factor for the cracks formation on the sample surface and the effective rupture energy are estimated.

p-Si substrates on the (111) planes are characterized by high resistance to fracture toughness. Electron irradiation improves the fracture toughness characteristics of p-Si wafers. Crack resistance of the p-Si+2at.%Ge wafers is characterized by a slight increase in the electron-irradiated state. In indentation processes, the mechanical properties of the p-Si+2at%Ge wafers, including the fracture toughness characteristics, are determined by two opposing factors: softening associated with germanium atoms with large atomic radius and hardening associated with the formation of more high-strength beta-tin-modification SiGe-II phase during the indentation-stimulated phase transformation process.

Keywords: Monocrystalline Si, SiGe alloys, indentation, microhardness, elastic limit, electron irradiation