

ალფა ნაწილაკებით დასხივების გავლენა p-SiGe შენადნობების ფუძემრეების დინამიურ მექანიკურ თვისებებზე

ია ყურაშვილი, კახაბერ შამათაგა, ეკატერინე სანაია, გიორგი ჩუბინიძე,
გიორგი დარსაველიძე

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო

აბსტრაქტი

შესწავლილია ალფა ნაწილაკებით დასხივების გავლენა p-SiGe შენადნობების (111) ორიენტაციის ფუძემრეების ელექტროფიზიკურ და დინამიურ მექანიკურ მახასიათებლებზე. ექსპერიმენტული გაზომვებით ნაჩვენებია ელექტრული წინააღმდეგობისა და დენის მატარებელი ხვრელების კონცენტრაციის ცვლილებათა მეტად გამოვლინება გერმანიუმის მაღალი კონცენტრაციული შემცველობის p-Si+2%Ge:B ფუძემრეებში. ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ საცდელ ნიმუშებში ფიქსირებულია გრეხითი რხევების კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციისა და დრეკადობის ზღვრის სიდიდეების 1,5-1,8-ჯერ ამაღლება და ძვრის დინამიური მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობის 15%-ით გაზრდა. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ ალფა ნაწილაკების დასხივებით ინდუცირებული რადიაციული წერტილოვანი დეფექტები p-SiGe შენადნობების კრისტალურ მესერში ქმნიან დისლოკაციების მოძრაობის დამამუხრუჭებელ დამატებით ცენტრებს და იწვევენ რადიაციული წარმოშობის დინამიურ მექანიკურ განმტკიცებას. განმტკიცების ეფექტი უფრო მეტად არის გამოვლენილი p-Si+2%Ge:B შენადნობის შემთხვევაში.

საკვანძო სიტყვები: სილიციუმი, გერმანიუმი, ალფა ნაწილაკი, ძვრის მოდული, დრეკადობის ზღვარი, დინამიური განმტკიცება

უკანასკნელი 10-15 წლის განმავლობაში სილიციუმზე დაფუძნებული ნახევარგამტარული მასალები, კერძოდ, სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მოცულობითი კრისტალები წარმოადგენენ ფართო კვლევის ობიექტს. პრაქტიკული გამოყენების სხვადასხვა პირობებში ისინი ამჟღავნებენ საუცხოო მექანიკურ, ელექტროფიზიკურ და ქიმიურ თვისებებს. იზოვალენტური გერმანიუმით ლეგირება აუმჯობესებს სილიციუმის ფუძემრეების მექანიკურ სიმტკიცეს. შესაბამისად იზრდება წარმოების გამოსავლიანობა, სელსაწყობის ეფექტურობა, მათ ფუძეზე შექმნილი დიდი ინტეგრალური სქემების, მიკროელექტრომექანიკური და ნანოელექტრომექანიკური სისტემების ოპერაციული საიმედოობა [1]. აღნიშნულიდან გამომდინარე არსებობს მუდმივი ინტერესი სილიციუმისა და სილიციუმის საფუძველზე არსებული მასალების სტრუქტურული, მექანიკური და ფიზიკური თვისებების კომპლექსური კვლევის პრობლემისადმი.

ამჟამად ცხადად არის წარმოჩენილი თანამედროვე მიკროელექტრონიკის ტექნოლოგიებში გერმანიუმითა და ბორით ერთობლივად დოპირებული სილიციუმის ფართოდ გამოყენების პერსპექტივები [2]. 10^{16} - 10^{18} cm^{-3} კონცენტრაციის გერმანიუმით დოპირება იწვევს მონოკრისტალურ Si:B კრისტალურ მესერში ძაბვების კომპენსაციას და ამცირებს ახალი დისლოკაციების გენერაციის შესაძლებლობებს [3]. ექსპერიმენტულად დადგენილია [4], რომ $(4-9)10^{19}$ cm^{-3} კონცენტრაციის გერმანიუმი აუმჯობესებს SiGe შენადნობების მექანიკურ თვისებებს. რადიაციული ტექნოლოგიების სწრაფი განვითარების პირობებში მკვეთრად გაიზარდა ინტერესი Si და SiGe შენადნობების ფუძეზე შექმნილი ნახევარგამტარული მასალების მექანიკური თვისებებისადმი. მიუხედავად აღნიშნული ვითარებისა დღეისათვის პრაქტიკულად შეუსწავლელია SiGe შენადნობების კრისტალების მექანიკური თვისებების მოდიფიცირების შესაძლებლობები სხვადასხვა წარმოშობის რადიაციული ზემოქმედების პირობებში.

წინამდებარე ნაშრომის მიზანია ალფა ნაწილაკებით დასხივებული მონოკრისტალური p-Si+0,25ატ.%Ge:B და p-Si+2ატ.%Ge:B შენადნობების ფუძემრეების ელექტროფიზიკური და მექანიკური თვისებების ცვლილებათა კანონზომიერებების შესწავლა.

(111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის მონოკრისტალური p-Si+0,25ატ.%Ge:B და p-Si+2ატ.%Ge:B ფუძემრეები დასხივდა $5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$ ფლუენსის ალფა ნაწილაკებით. ასეთი ფლუენსით ალფა ნაწილაკებით დასხივება SiGe კრისტალურ მესერში წარმოქმნის სხვადასხვა ტიპის წერტილოვან რადიაციულ დეფექტებს (C_i , O_i , S_i , C_iO_i , C_iC_s და ა.შ). ცნობილია [5], რომ აღნიშნული წერტილოვანი რადიაციული დეფექტები თერმულად მდგრადია ოთახის ტემპერატურის პირობებში [5] და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებზე Si-ის ფუძეზე არსებულ ნახევარგამტარულ მასალებში.

ელექტროფიზიკური მახასიათებლების (კუთრი ელექტროწინაღობა, დენის მატარებლების კონცენტრაცია, ძვრადობა) მნიშვნელობები განსაზღვრულია ვან დერ ჰაუს მეთოდით ოთახის ტემპერატურის პირობებში Ecopia HMS-3000 სისტემის დანადგარზე. მეტალოგრაფიული კვლევები განხორციელდა ოპტიკურ მიკროსკოპზე NMM-80RF/TRT.

გრეხითი რხევების სიხშირის 0,5-5,0 ჰც დიაპაზონში ენერჯის მილევის ლოგარითმული დეკრემენტის განსაზღვრით სრულდებოდა შინაგანი ხახუნის ფონის შეფასება ამპლიტუდური დეფორმაციის 10^{-5} - $5 \cdot 10^{-3}$ ინტერვალში.

ძვრის მოდულის აბსოლუტური სიდიდე განისაზღვრა ეტალონთან შედარების მეთოდით:

$$G = G_0 \cdot \frac{f^2}{f_0^2}$$

სადაც G_0 და f_0 წარმოადგენს ეტალონური ნიმუშის (ვანადიუმი) ძვრის მოდულისა და გრეხითი რხევების სიხშირეს, ხოლო G და f არიან საცდელი ნიმუშების ძვრის მოდულისა და გრეხითი რხევების სიხშირის მნიშვნელობები.

დრეკადობის ზღვარი შეფასებულია ცნობილი დამოკიდებულების საფუძველზე:

$$\sigma = \varepsilon \cdot G$$

სადაც ε - ფარდობითი გრეხითი დეფორმაცია, G -ძვრის მოდული, ხოლო σ არის დრეკადობის ზღვარი.

გაზომვები შესრულდა ლაბორატორიულ მექანიკურ რელაქსატორზე 10^{-4} ტორი ვაკუუმში ოთახის ტემპერატურაზე.

ელექტროფიზიკური მახასიათებლების შესამჩნევი ცვლილებები გამოვლინდა ორივე ნიმუშში ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობაში (ცხრილი 1).

გერმანიუმით ლეგირება გავლენას ახდენს რადიაციული დეფექტების წარმოქმნის პირობებსა და თერმულ მდგრადობაზე, კერძოდ, SiGe შენადნობებში ინტენსიურად წარმოებს O_i და C_s მინარევების შემცველი კომპლექსების დისოციაცია-გარდაქმნის პროცესები. ცხრ.1-დან ჩანს, რომ გერმანიუმის მეტი შემცველობის p-SiGe შენადნობში უფრო გამოკვეთილად ვლინდება რადიაციული დეფექტების სტრუქტურაში გარდაქმნებით გამოწვეული ელექტრული მახასიათებლების ცვლილებები.

ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ ნიმუშებში იწვინება დიაპაზონის შთანთქმის სპექტრში გამოვლენილია კრისტალური მესრის სითბური რხევებითა და V , O_i , O_s , C_i , C_s და Si_i ცენტრებთან დაკავშირებული მაქსიმუმების ერთობლიობა.

რადიაციულ დეფექტებს განეკუთვნებიან მაქსიმუმები 830 სმ^{-1} (ელექტრულად ნეიტრალური A-ცენტრი, VO^0), 885 სმ^{-1} (VO^-), 546 სმ^{-1} (C_iC_s , ჩანერგილი (C_i) და ჩანაცვლებული (C_s) ნახშირბადის ატომების წყვილი), $860-862 \text{ სმ}^{-1}$ (C_iO_i , ჩანერგილი C_i და O_i ატომების წყვილები), 936 სმ^{-1} ($C_iO_i(Si_i)$, ჩანერგილ Si_i -სთან ურთიერთმოქმედი C_iO_i წყვილი). ეს რადიაციული დეფექტი ხშირად ვლინდება სატელიტთან ერთობლივად 1020 სმ^{-1} ტალღური ვექტორის ზოლში.

ცალკეული მაქსიმუმების ოპტიკური შთანთქმის ფარდობითი უნარიანობისა და კალიბრების სათანადო კოეფიციენტების გამოყენებით შეფასებული იქნა O_i და C_s მინარევების კონცენტრაციები. შედარებითი ანალიზით დგინდება, რომ $5 \cdot 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$ ფლუენსის ალფა ნაწილაკებით დასხივება შესამჩნევად ამცირებს ჩანერგვის პოზიციებში არსებული ჟანგბადის ატომების კონცენტრაციას. შედარებით სუსტად მცირდება ჩანაცვლების პოზიციებში განთავსებული ნახშირბადის ატომების კონცენტრაცია (ცხრილი 1).

ცხრილი 1. p-SiGe ფუძემრეების ელექტროფიზიკური მახასიათებლები

ნიმუშები	ნიმუშების მდგომარეობა	კუთრი ელექტრო წინაღობა, ომი.სმ	ხგრელების კონცენტრაცია, მსმ ⁻³	ხგრელების ძვრადობა, სმ ² ·წმ ⁻¹	ჟანგბადის (O _i) კონცენტრაცია, სმ ⁻³	ნახშირბადის (C _s) კონცენტრაცია, სმ ⁻³
p-Si+0,25%Ge:B	საწყისი	9	2·10 ¹⁵	345	2·10 ¹⁸	6·10 ¹⁶
	ალფა ნაწილაკებით დასხივებული	19	8·10 ¹⁴	365	8·10 ¹⁷	4·10 ¹⁶
p-Si+2%Ge:B	საწყისი	7	4·10 ¹⁵	230	1·10 ¹⁸	5·10 ¹⁶
	ალფა ნაწილაკებით დასხივებული	17,5	1·10 ¹⁵	360	7·10 ¹⁷	3·10 ¹⁶

რადიაციული დეფექტების ჩასახვისა და მოძრაობის აქტივაციური მახასიათებლების განსაზღვრისათვის ექსპერიმენტულად შესწავლილია p-SiGe შენადნობების ფუძემრეების ძვრის მოდულისა და გრეხითი რხევების შთანთქმის ინტენსივობის ცვლილებათა კანონზომიერებანი. შედარებისათვის განისაზღვრა ასევე დაუსხივებელ მდგომარეობაში ნიმუშების მექანიკური მახასიათებლები.

მეტალოგრაფიული კვლევების თანახმად საცდელ ნიმუშებში დისლოკაციების სიმკვრივე 10³-10⁴ სმ⁻² შუალედში იცვლება. ასეთ შემთხვევებში დისლოკაციების ბირთვებს შორის მანძილების საშუალო სიდიდე 5-10 მკმ-ს შეადგენს, რაც მეტად ამცირებს მათი ურთიერთქმედებისა და ურთიერთბლოკირების წვლილს მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებებში. ასეთი სიმკვრივის დისლოკაციების წვლილი შესაძლებელია გამოვლინდეს თერმული, დეფორმაციული და რადიაციული წარმოშობის დეფექტებთან ინტენსიური ურთიერთქმედებით, რითაც მნიშვნელოვნად შეიცვლება წერტილოვანი დეფექტების დიფუზიის სიჩქარეები და შეიქმნება მასალის განმტკიცების რეალური შესაძლებლობები. მართლაც 5·10¹²სმ⁻² ფლუენსის ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ ნიმუშებში შემჩნეულია დინამიური მექანიკური მახასიათებლების განსხვავებული სიდიდეები. ცხრ.2-ში წარმოდგენილია საწყისი და ალფა ნაწილაკებით დასხივებული საცდელი ნიმუშების დინამიური მექანიკური მახასიათებლები.

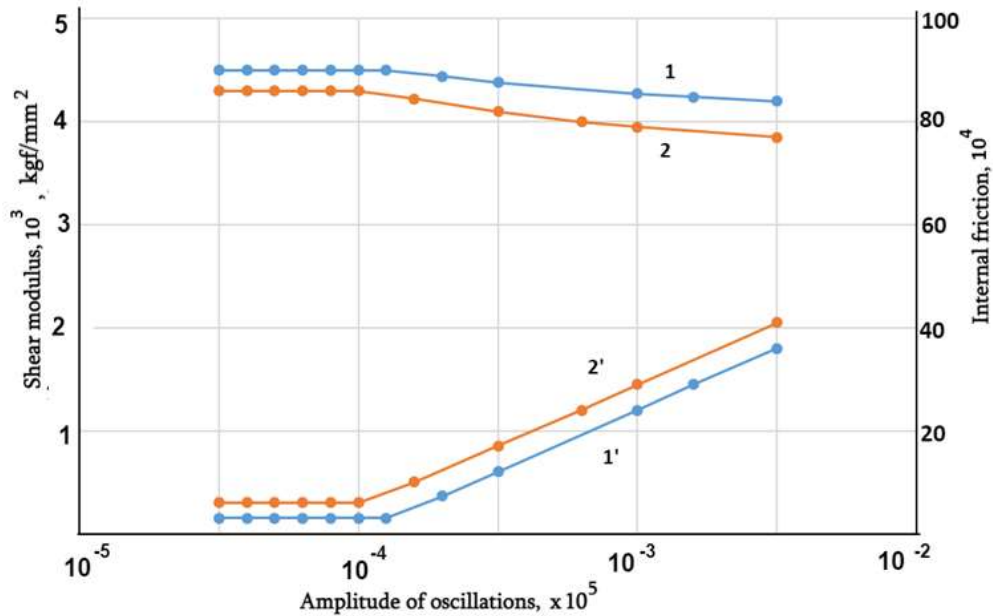
ცხრილი 2: საწყისი და ალფა ნაწილაკებით დასხივებული p-SiGe ფუძემდებლის დინამიური - მექანიკური მახასიათებლები

ექსპერიმენტული ნიმუშები	ნიმუშების მდგომარეობა	დისლოკაციების სიმკვრივე, სმ^{-2}	ძვრის მოდული, კგ/მმ^2	ამპლიტუდური დეფორმაცია, $\times 10^5$	დრეკადობის ზღვარი, კგ/მმ^2
p-Si+0,25%Ge:B	საწყისი	$5 \cdot 10^3$	4750	20	0.95
	α -ნაწილაკებით დასხივებული	$5 \cdot 10^3$	4830	35	1.70
p-Si+2%Ge:B	საწყისი	$1 \cdot 10^4$	4600	15	0.61
	α -ნაწილაკებით დასხივებული	$3 \cdot 10^4$	4720	25	1.20

მეორე ნიმუშში საწყის მდგომარეობაში რეგისტრირებულია მექანიკური მახასიათებლების შემცირება, რაც განპირობებულია გერმანიუმის მაღალი კონცენტრაციით. Ge იწვევს მესრის პარამეტრის ზრდას და, შესაბამისად, კოვალენტური ატომთაშორისი კავშირების შესუსტებას. თავის მხრივ ეს განპირობებულია სილიციუმის კრისტალურ მესერში ჩანაცვლების პოზიციამ დიდი ატომური რადიუსის მქონე ($\sim 1,22\text{\AA}$) გერმანიუმის განთავსებითა და მესრის ლოკალური შეკუმშვის დეფორმაციული ველის ფორმირებით.

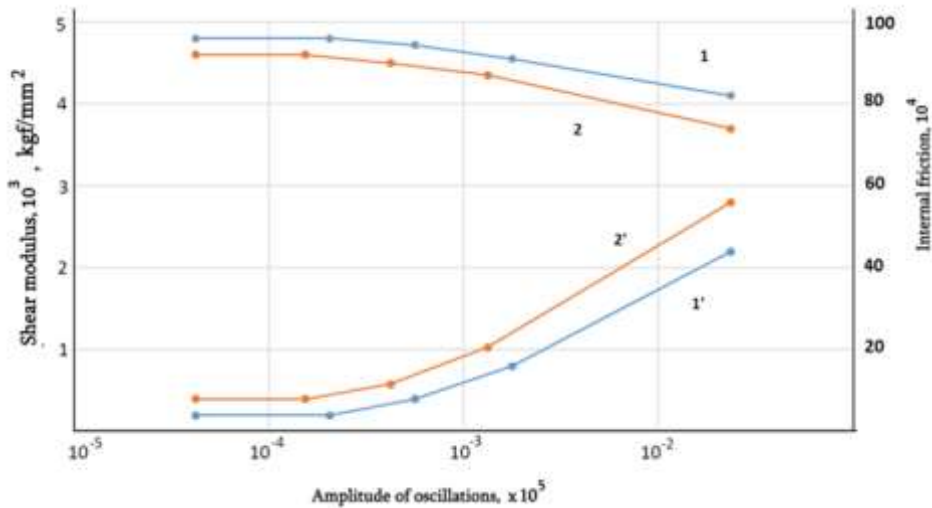
ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობაში ორივე შენადნობის დინამიური მექანიკური მახასიათებლები საგრძნობლად იზრდება. ეს უფრო ნათლად ჩანს მეორე შენადნობის მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებებში. ცნობილი მოსაზრებების თანახმად, გერმანიუმის ატომები აფერხებენ ჟანგბადის კომპლექსებისა და მიკროფაზების ფორმირებას, რითაც სტიმულირდება ჟანგბადის ატომების დიფუზია დისლოკაციების ბირთვების მიმართულებით. ასეთ პირობებში ერთდროულად მიმდინარეობს მათი ერთი ნაწილის განთავსება უშუალოდ დისლოკაციების ბირთვებში და მეორე ნაწილის თავმოყრა დისლოკაციების ირგვლივ არსებულ კოტრელის ატმოსფეროში. ორივე ფაქტორი განაპირობებს დისლოკაციების ძვრადობის შეზღუდვას. ასეთ პირობებში ხორციელდება სილიციუმის სტრუქტურის დინამიური მექანიკური განმტკიცება.

ექსპერიმენტულად გამოვლენილი შედარებით მაღალი მექანიკური განმტკიცება ($\sim 1,5-1,8$ -ჯერ) გამოწვეულია დისლოკაციების ძლიერი დეკორირებით O და C მინარევებითა და რადიაციული დეფექტების კომპლექსებით, რომლებიც შეიცავენ ჩანერგვის პოზიციამ რადიაციით გადასროლილ O_i და C_i ატომებს.



ნახ. 1. საწყისი SiGe ფუძემრეების ძვრის მოდულისა (1,2) და შინაგანი ხახუნის (1',2') ამპლიტუდური დამოკიდებულება 1,1'- p-Si+0,25%Ge:B; 2,2'- p-Si+2%Ge:B

საცდელი ნიმუშების სტრუქტურაში არსებული დისლოკაციები, არათანაბრად განაწილებული თერმული წარმოშობის ძაბვები და წერტილოვანი დეფექტები წარმოადგენენ არადრეკადობის გამოვლინების მიზეზებს დრეკადი დეფორმაციის პირობებში. მართლაც ოთახის ტემპერატურაზე ძვრის დინამიური მოდულისა და გრეხითი რხევების სიხშირის 0,5-5,0 ჰც დიაპაზონის შინაგანი ხახუნის ამპლიტუდური დამოკიდებულებები ავლენენ კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის ფიქსირებულ მნიშვნელობებს, რომლებზედაც მექანიკური მახასიათებლები მკვეთრად იცვლებიან. ნახ. 1-ის თანახმად დაუსხივებელი ნიმუშები ამპლიტუდური დეფორმაციის დაბალ დიაპაზონში ინარჩუნებენ ძვრის მოდულისა და შინაგანი ხახუნის მუდმივ მნიშვნელობებს. კრიტიკულ ამპლიტუდურ დეფორმაციებზე იწყება მათი წრფივი ცვლილება, კერძოდ, წრფივად მცირდება ძვრის მოდული, ხოლო შინაგანი ხახუნის ფონი განიცდის წრფივად ამაღლებას. გერმანიუმის მაღალი შემცველობის ნიმუშისათვის შემცირებულია კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციისა და ძვრის დინამიური მოდულის სიდიდეები. ეს გარემოება განპირობებულია გერმანიუმის წვლილით ატომთაშორისი კავშირის ძალების შესუსტებაში. კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის ერთადერთი მნიშვნელობის არსებობა მიუთითებს, რომ დაუსხივებელი ნიმუშების კრისტალურ მესერში არსებობს ერთი ტიპის წერტილოვანი დეფექტების სიმრავლე, რომელიც ურთიერთქმედებს დისლოკაციურ სტრუქტურასთან.



ნახ. 2. ალფა ნაწილაკებით დასხივებული SiGe ფუძემრეების ძვრის მოდულისა (1,2) შინაგანი ხახუნის (1',2') ამპლიტუდური დამოკიდებულება 1,1'- p-Si+0,25%Ge:B; 2,2'- p-Si+2%Ge:B

ალფა ნაწილაკებით დასხივებული ნიმუშების კრისტალურ მესერში მოსალოდნელია სხვადასხვა შედგენილობისა და კონფიგურაციის რადიაციული დეფექტების ფორმირება, რომლებიც ქმნიან განსხვავებული დონის ენერგეტიკულ ბარიერებს დისლოკაციებისათვის. რადიაციული დეფექტები მნიშვნელოვნად ცვლიან კრისტალიზაციის პროცესში შექმნილი თერმული დეფექტების კონცენტრაციას, მათ სივრცულ განაწილებასა და შედგენილობას, რაზედაც არსებითად დამოკიდებულია დისლოკაციური სტრუქტურის ძვრადობა. SiGe შენადნობების ორივე ნიმუში ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობაში ხასიათდება მექანიკური მახასიათებლების კანონზომიერების მრავალჯერადი ცვლილებებით ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო დიაპაზონში (ნახ.2). ორივე ნიმუში ხასიათდება ძვრის მოდულისა და შინაგანი ხახუნის ფომის პრაქტიკულად ერთნაირი ცვლილებებით. განმასხვავებელ ნიშნად წარმოჩენილია კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის ამაღლებული მნიშვნელობები გერმანიუმის მცირე შემცველობის SiGe შენადნობისათვის. ზემოთ აღნიშნული ხასიათის დისლოკაციური სტრუქტურის ძვრადობის ცვლილებები შესაძლებელია დაკავშირდეს მინარევებისაგან თავისუფალ დისლოკაციებთან, რომლებიც წარმოიქმნებიან მონოკრისტალური SiGe ფუძემრეების დამზადების პროცესში. მათი ძვრადობისა და, მაშასადამე, დინამიური მექანიკური თვისებების მართვა, როგორც შესრულებლულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, შესაძლებელია გერმანიუმისა და რადიაციული დეფექტების შემცველობის ცვლილებით.

ლიტერატურა:

1. D.Y.Oliver, D.B.Lawn, R.F. Cook, M.G. Reitsma, I.E. Bradby, I.S. Williams, P.Munroe. J.Mater. Res. Vol. 23, #2 (2008), 297-301
2. I.Yonenaga, J.Materials, Science: Materials in Electronics, 10 (1999), 329-333.
3. D.Yang, X.Yu, X.Ma, Y.Xu, L. Li and D.Que. J. Cryst. Growth, 243 (2002) 371-376
4. J.Chen, D.Yang. X.Ma, Z.Zeng, D.Tian. L.Li, D. Que, L.Gong. J.Appl. Phys., 103, (2008), 123521-1-123521-6
5. C.A.Londos, A. Andrianakis, E.N. Sgorou, V.Emtsev, and H.Ohyama. J. Applied Phys, 107 (2010)093520-1- 093520-7.

Influence of alpha particle irradiation on dynamic mechanical properties of p-SiGe substrates

**Ia Kurashvili, Kakhaber Shamatava, Ekaterine Sanaia, Giorgi Chubinidze,
Giorgi Darsavelidze**

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

Abstract. Influence of alpha particle irradiation on electrophysical and dynamic mechanical properties of p-SiGe substrates with (111) orientation has been studied. Experimental results show, that changes in electrical resistance and concentration of current-carriers holes are more revealed in p-Si+2%Ge:B substrates with high Ge content. In the alpha-irradiated test samples increase of the values of torsional oscillations strain amplitude and elastic limit by 1.5-1.8 times and 15 % increase of absolute value of shear modulus are observed.

It is supposed, that the radiation point defects induced by alpha particle irradiation in the p-SiGe crystalline lattice form additional braking centers for dislocation motion and cause the radiation origin dynamic mechanical strengthening. The strengthening effect is more revealed in p-Si+2%Ge:B alloy.

Keywords: *silicon, germanium, alpha particle, shear modulus, elastic limit, dynamic strengthening*