

რელაქსაციური შინაგანი ხახუნის თავისებურებანი ^{60}C i გამა ფოტონებით დასხივებულ მონოკრისტალურ SiGe:P შენადნობებში

ია ყურაშვილი, გიორგი დარსაველიძე, გიორგი ჩუბინიძე, დავით მხეიძე, მარინა ქადარია, ნარგოზა გოგოლაშვილი, ტატიანა მელაშვილი

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინტიტუტი, თბილისი, საქართველო

აბსტრაქტი

$5 \cdot 10^{16} \text{ სმ}^{-2}$ ფლუენსის ^{60}C i გამა ფოტონებით დასხივებული Si+1,5ატ.%Ge:P (10^{15} სმ^{-3}) მონოკრისტალური შენადნობის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურულ სპექტრში გრეხითი რხევების 1 ჰც სიხშირის დიაპაზონში გამოვლენილია რადიაციული დეფექტებისა და დისლოკაციების ურთიერთქმედებით განპირობებული რელაქსაციური პროცესი. ექსპერიმენტულად დადგენილია დეფორმაციული წარმოშობის რელაქსაციური შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმების აქტივაციის ენერჯისა და ძვრის დინამიური მოდულის ზრდის ტენდენცია. ძვრის მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობის ზრდისა და ზიგზაგისებური ტემპერატურული ცვლილებების საფუძველზე ნაჩვენებია თერმული და რადიაციული დეფექტებით გარემოცული დისლოკაციების ძვრადობის მართვის შესაძლებლობები. გაანალიზებულია რადიაციული დეფექტების წვლილი საცდელი ნიმუშის რადიაციულ განმტკიცებაში. ნაშრომში მიღებული შედეგები შესაძლებელია გათვალისწინებული იქნას ტექნოლოგიებისა და კონსტრუქტორების მიერ SiGe შენადნობების საფუძველზე განსაზღვრული ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების მასალებისა და ხელსაწყოების დამუშავებასა და შექმნაში.

საკვანძო სიტყვები: SiGe შენადნობები, გამა რადიაცია, რელაქსაცია, დისლოკაციური სტრუქტურა, აქტივაციის ენერჯია, ძვრის მოდული.

Si-Ge სისტემის მოცულობითი კრისტალების ფუძემრეები წარმოადგენენ ელექტრონული ხელსაწყოების პერსპექტულ მასალებს. ყურადღებას იმსახურებს 10^{19} - 10^{20} სმ^{-3} კონცენტრაციის გერმანიუმით ლეგირებული Si-Ge შენადნობები. მათში პრაქტიკულად შენარჩუნებულია Si-ს კრისტალური სტრუქტურისა და ფიზიკური თვისებების ძირითადი მახასიათებლები, ხოლო კრისტალურ მესერში ჩანაცვლების პოზიციებში გახსნილი გერმანიუმის ატომები ახორციელებენ მათ მოდიფიცირებას [1]. Si-Ge შენადნობების ფუძემრეებისა და მათზე ფორმირებული ეპიტაქსიური ფენების მესრის პარამეტრების ურთიერთშეთავსება გერმანიუმის კონცენტრაციის ცვლილებით განაპირობებს ფაზათა გამყოფ საზღვარზე

მაბვების რეგულირების შესაძლებლობებს. ეს მეტად მნიშვნელოვანია Si-Ge შენადნობების საფუძველზე შექმნილი ნახევარგამტარული ფოტოდეტექტორების, რადიაციის სენსორების, მზის ელემენტების, რენტგენის სხივებისა და ნეიტრონების მონოქრომატორების ეფექტურობის ასამაღლებლად [2].

Si-Ge შენადნობების კრისტალურ მესერში ფორმირებულია სხვადასხვა სიგრძისა და კავშირების სიმტკიცის ურთიერთმეზობელი ატომთა წყვილები: Ge-Ge, Ge-Si და Si-Si. ისინი ერთმანეთისაგან განსხვავებული ინტენსივობით ახდენენ ზეგავლენას რეალურ სტრუქტურაში მათთან ლოკალიზებული ძაბვებისა და დეფექტების ფორმირების პროცესებზე [3]. კერძოდ, მოსალოდნელია მნიშვნელოვნად შეიცვალოს სტრუქტურაში არსებული დეფექტების მოძრაობის აქტივაციის პირობები. Si-Ge შენადნობების შემადგენელი Si და Ge კომპონენტების წყვილებს შეუძლიათ შეცვალონ ტექნოლოგიური მინარევების ატომებისა და კომპლექსების ჩასახვისა და დიფუზიის მექანიზმები და მოახდინონ სტრუქტურულად-მგრძობიარე თვისებების ცვლილებები [4].

დღეისათვის მეტად სუსტადაა შესწავლილი Si-Ge შენადნობების სტრუქტურულად-მგრძობიარე თვისებებზე წერტილოვანი და დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების ურთიერთქმედებისა და მოძრაობის აქტივაციის ენერჯის გავლენის მიკროსკოპული მექანიზმები. Si-ის ფუძეზე ფორმირებული Si-Ge სისტემის შენადნობების სტრუქტურულად-მგრძობიარე მექანიკური თვისებები გერმანიუმის კონცენტრაციის ცვლილებით მეტად არაპროგნოზირებადი კანონზომიერებებით ხასიათდებიან დისლოკაციების მცირე შემცველობის შემთხვევაში. Si-Ge შენადნობებში Ge-ს (0-5ატ.%) ზრდის პირობებში მექანიკური თვისებების მახასიათებლები პრაქტიკულად წრფივი დამოკიდებულებით მცირდებიან, აღნიშნული გარემოება დაკავშირებულია გერმანიუმის კოვალენტური რადიუსის 4%-ით მაღალ მნიშვნელობასთან, რაც იწვევს მესრის პარამეტრისა და ლოკალურად ატომთაშორისი მანძილების ზრდას. შესაბამისად მცირდება კავშირის ძალები და მათთან დაკავშირებული მექანიკური მახასიათებლები.

დისლოკაციების ამაღლებული სიმკვრივის პირობებში (10^{10}სმ^{-2}) მოსალოდნელია დინამიური განმტკიცება, რადგან იქმნება გერმანიუმისა და მინარევების ატომებით დისლოკაციების ბლოკირების პირობები.

მექანიკური თვისებების რთული ხასიათის ცვლილებები ექსპერიმენტულად გამოვლენილი იქნა Si-Ge შენადნობების დაბალ სიხშირული გრეხითი რხევების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურისა და ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო დიაპაზონებში [5].

ნაჩვენებია გერმანიუმის კონცენტრაციის 0-5ატ% ინტერვალში Si-Ge შენადნობებში დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების მოძრაობის აქტივაციის ენერჯის არამონოტონური ცვლილებები. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებითა და ალფა ნაწილეკებით დასხივებულ Si-Ge შენადნობებში გამოვლენილია ძვრის მოდულის ვარდნისა და ამაღლების ტემპერატურული არეები, რაც ნათლად ადასტურებს დინამიურ მექანიკურ განმტკიცებას ლოკალიზებული ძაბვების ველში დისლოკაციების მერხვეი სეგმენტების დამუხრუჭების მექანიზმით [6]. აღნიშნულ შემთხვევებში დისლოკაციების მოძრაობის

დამამუხრუჭებელ ცენტრებად გერმანიუმის, ჟანგბადისა და დოპანტების ატომებთან ერთობლივად გვევლინებიან რადიაციული დეფექტები და მათი კომპლექსები, განთავსებული ე.წ. კოტრელის ატმოსფეროსა და უშუალოდ დისლოკაციების ბირთვებში.

ნაშრომის მიზანია [111] ორიენტაციის მონოკრისტალური Si+1,5ატ%Ge:P(10^{15} სმ⁻³) შენადნობის შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურული სპექტრის შესწავლა საწყის და გამა ფოტონებით დასხივებულ მდგომარეობებში. საცდელი კრისტალები მიღებულია ჩოხრალსკის მეთოდით. კვლევებისათვის პროფილირებული ნიმუშები მომზადდა ალმასის დისკზე ჭრის, ხეხვისა და მექანიკური პოლირების სტანდარტული მეთოდებით. (111) ორიენტაციის სიბრტყეებზე მეტალოგრაფიული კვლევა განხორციელდა ოპტიკურ მიკროსკოპზე NMM-80RF/TRF. შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ექსპერიმენტული გაზომვები შესრულდა გრეხითი რხევების სიხშირისა და მილევის ლოგარითმული დეკრემენტის განსაზღვრის მეთოდით სიხშირის 0,5-5,0 ჰც ამპლიტუდური დეფორმაციის 10^{-5} - 10^{-3} და ტემპერატურის 20-900°C ინტერვალში. ნიმუშების (111) ორიენტაციის ზედაპირებზე ელექტროფიზიკური მახასიათებლები განისაზღვრება ოთახის ტემპერატურის პირობებში Ecopia HMS-3000 დანადგარზე.

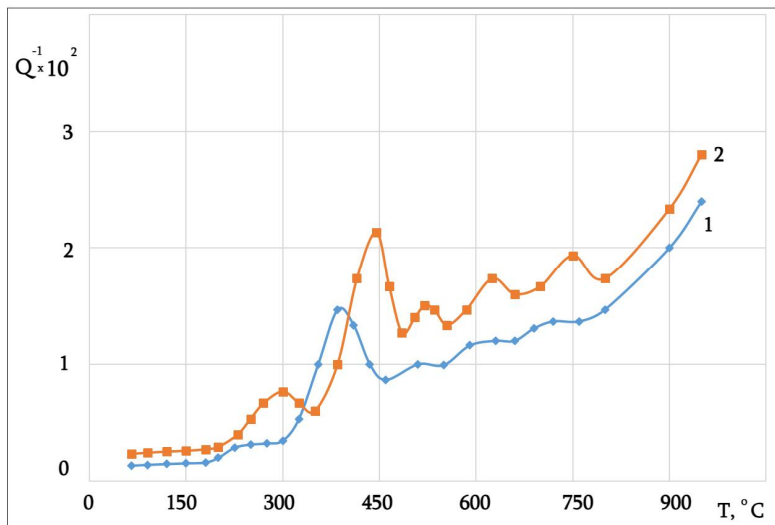
მიკროსტრუქტურული კვლევებით დადგინდა, რომ საწყისი Si-Ge ნიმუშის (111) ორიენტაციის ზედაპირზე დისლოკაციების განაწილება ერთგვაროვანია და ხასიათდება სიმკვრივით $5 \cdot 10^4$ სმ². გამა ფოტონებით დასხივება პრაქტიკულად არ ცვლის დისლოკაციების სიმკვრივეს. შეინიშნება მცირე განსხვავება დისლოკაციების მოწამვლის ფიგურების ზომებში. კერძოდ, სხვადასხვა ნიმუშის მოწამვლის ფიგურების საერთო რაოდენობის 10-15% წარმოადგენენ შემცირებული ზომების სამკუთხედის ფორმის ფიგურებს. მოწამვლის ფიგურებში აღნიშნული ხასიათის განსხვავების წარმოქმნა შესაძლებელია დაკავშირებულია რადიაციით ინიცირებულ ძლიერ ლოკალიზებულ დეფორმაციულ არეებთან. შესამჩნევად იცვლება ელექტრული მახასიათებლების სიდიდეები $5 \cdot 10^{16}$ სმ⁻² ფლუენსის გამა ფოტონებით დასხივებულ მდგომარეობაში (ცხრ.1).

[111] ორიენტაციის Si+2%Ge:P (10^{15} სმ⁻³) შენადნობების ფიზიკური მახასიათებლები

ცხრილი 1

ნიმუში Si+1,5%Ge:P	კუთრი ელექტროწინაღ ობა, ომისმ	ხვრელების კონცენტრაცი ა, სმ ⁻³	ხვრელებ ის ძვრადობა , სმ ² /ვწმ	დისლოკაციებ ის სიმკვრივე , სმ ⁻²	ძვრის მოდულ ი, კგ/მმ ²
საწყისი მდგომარეობა	14,5	$1 \cdot 10^{15}$	430	$4 \cdot 10^4$	4550
გამა ფოტონებით დასხივებული	20,7	$7 \cdot 10^{14}$	380	$5 \cdot 10^4$	4780

აღსანიშნავია, რომ დენის მატარებელი ხვრელების კონცენტრაციის შემცირებას თან ახლავს მათი ძვრადობის შემცირება. ხვრელების ძვრადობის შემცირება განპირობებულია მათი გაბნევით რადიაციული დეფექტების კლასტერებსა და კომპლექსებზე, რომლებიც წარმოიქმნებიან სათანადო კონცენტრაციით გამა ფოტონებით დასხივების პროცესში. დენის მატარებელი ხვრელების კონცენტრაციისა და ძვრადობის ერთდროული შემცირება თავის მხრივ იწვევს Si-Ge შენადნობების კუთრი ელექტროწინააღობის 1,4-ჯერ ამაღლებას. ჩოხრაღსკის მეთოდით კრისტალიზაციის პროცესში განვითარებული თერმული ძაბვები და Ge-Ge კლასტერებთან ლოკალიზებული დეფორმაციული ველი წარმოქმნიან Si-Ge შენადნობის მოცულობითი კრისტალის სტრუქტურაში დისლოკაციური წყობის დეფექტებსა და მიკროსიგარიელებს. მათი რეგისტრაცია არ ხერხდება მეტალოგრაფიულ მიკროსკოპზე, მაგრამ ირიბად შესაძლებელია ელექტრულ და მექანიკურ თვისებებზე მათი გავლენის გამოვლინება. ძლიერ ლოკალიზებული დეფორმაციული ველებისა და დისლოკაციური სტრუქტურის რთული აღნაგობისა და ძვრადობის შესახებ მდიდარ ინფორმაციას იძლევიან სტრუქტურულად-მგრძნობიარე შინაგანი ხახუნის სპექტრები ტემპერატურისა და ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო დიაპაზონში. მართლაც საცდელი SiGe შენადნობის საწყისი მდგომარეობა ხასიათდება შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ტემპერატურული სპექტრების მეტად რთული ფორმით (ნახ.1).



ნახ.1. გამა ფოტონებით დასხივების გავლენა მონოკრისტალური Si+2%Ge:P (10^{15} სმ⁻³) შენადნობის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურულ სპექტრზე.

1. საწყისი, $f_0=1,43$ ჯ.;
2. $5 \cdot 10^{16}$ სმ⁻² ფლუენსის ⁶⁰Co გამა ფოტონებით დასხივებული, $f_0=1,53$ ჯ.;

საცდელი SiGe:P შენადნობის პრიზმის ფორმის (0,6 x 0,6 x 30 მმ³) (111) ორიენტაციის ნიმუშის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრი შებრუნებული გრეხითი ქანქარის 1,5 ჰც სიხშირესა და $2 \cdot 10^{-5}$ ამპლიტუდური დეფორმაციის პირობებში წარმოადგენს ურთიერთზედებული 5 მაქსიმუმის და ექსპონენციალურად მზარდი ფონის ერთობლიობას. მაქსიმუმების კრიტიკული ტემპერატურებია 400, 510, 600-610, 700°C. შინაგანი ხახუნის ფონის

მკვეთრი ზრდა იწყება 780-800°C ტემპერატურაზე. ყველა მაქსიმუმის ტემპერატურა დამოკიდებულია გრეხითი რხევების სიხშირეზე, რაც დასტურდება სხვადასხვა იდენტური ნიმუშის სიხშირის გაზომვით ოთახის ტემპერატურაზე.

მაქსიმუმების კრიტიკული ტემპერატურების სიხშირული დამოკიდებულება დამახასიათებელია რელაქსაციური წარმოშობის შინაგანი ხახუნის პროცესებისათვის. ცალკეული რელაქსაციური მაქსიმუმის აქტივაციის ენერგია შეფასდა კრიტიკული ტემპერატურითა და სიხშირით ცნობილი ფორმულის საფუძველზე:

$$H = K \cdot T_{max} \cdot \ln \frac{kT_{max}}{hf_{max}} \quad [7]$$

სადაც K და h ბოლცმანის და პლანკის მუდმივებია, ხოლო T_{max} და f_{max} - მაქსიმუმის ტემპერატურა და რხევის სიხშირე.

რელაქსაციური შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმების სიხშირის ფაქტორის სიდიდეების განსაზღვრა რელაქსაციის დროის ექსპონენციალური დამოკიდებულებიდან: $\omega\tau = 1$ ანუ $2\pi f_{max} \cdot \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{H}{kT_{max}}\right) = 1$ [7], საიდანაც მიიღება სიხშირის ფაქტორის მნიშვნელობები $\tau_0^{-1} = 2\pi f_{max} \exp\left(\frac{H}{kT_{max}}\right)$.

რელაქსაციური პროცესების აქტივაციური მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრ. 2-ში.

SiGe:P შენადნობების რელაქსაციური პროცესების მახასიათებლები

ცხრილი 2

საცდელი ნიმუში	მაქსიმუმის ტემპერატურა, °C	აქტივაციის ენერგია, ევ.	სიხშირის ფაქტორი, წმ ⁻¹	ძვრის მოდული, კგ/მმ ²
Si+1,5%Ge:P				
საწყისი	400	1,50	2·10 ¹²	4550
	500	1,65	4·10 ¹¹	
	600-610	1,80	3,5·10 ¹²	
	700	2,0-2,10	4·10 ¹¹	
5·10 ¹⁶ სმ ⁻² ფლუენსის გამა ფოტონებით დასხივებული	300	1,35	5·10 ¹²	4700
	420	1,55	1·10 ¹²	
	510	1,70	9·10 ¹¹	
	620	1,85	1,2·10 ¹¹	
	715	2,10	2·10 ¹¹	

ცხრილში წარმოდგენილია აგრეთვე ოთახის ტემპერატურაზე ეტალონის სიხშირესთან შედარების მეთოდით განსაზღვრული ძვრის მოდულის მნიშვნელობები. ეტალონად

გამოყენებულია საცდელი ნიმუშის იდენტური ზომების პოლიკრისტალური ვანადიუმი. სხვადასხვა ტემპერატურაზე რხევების სიხშირისა და რაოდენობის რეგისტრაცია სრულდებოდა ნიმუშის გახურების 2 გრად/წთ სიჩქარეზე. ასეთ პირობებში ნიმუში განიცდიდა თერმულ მოწვას. რის შედეგადაც შინაგანი ხახუნის ფონი შემცირდა 10-15%-ით, ხოლო ყველა რელაქსაციურმა მაქსიმუმმა გამოავლინა თერმული მდგრადობა და პრაქტიკულად შეინარჩუნა კრიტიკული ტემპერატურის საწყისი მნიშვნელობები. ექსპერიმენტით გამოვლენილია ყველა მაქსიმუმის დამოკიდებულება გრეხითი რხევების ამპლიტუდაზე. კერძოდ, აღმოჩნდა, რომ ფარდობითი ამპლიტუდური დეფორმაციის გაზრდით 10^{-5} - დან 10^{-3} მდე რელაქსაციური მაქსიმუმების ინტენსივობა მალდდება 15 -20%-ით და მიისწრაფის ნაჯერობისაკენ. აღნიშნული ხასიათის ცვლილებები დამახასიათებელია წერტილოვანი დეფექტებით გარემოცული დისლოკაციების მოძრაობისათვის პერიოდული მექანიკური ძაბვის ველში.

პირველი გაზომვის პროცესში თერმული მოწვით გამოწვეული ფონის შემცირება აჩვენებს დისლოკაციების ბმების გაძლიერებას მათი ბირთვებისაკენ დიფუზიით გადაადგილებული წერტილოვანი დეფექტების გავლენით. ასეთ პირობებში განმეორებითი გაზომვების პროცესში რელაქსაციური შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმების ამპლიტუდური დამოკიდებულების გამოვლინება შესაძლებელია მხოლოდ 5-10 ჯერ ამაღლებული ამპლიტუდური დეფორმაციის პირობებში. განმეორებით ექსპერიმენტებში ოთახის ტემპერატურაზე მკაფიოდ დაფიქსირდა რხევის სიხშირის ზრდა და, შესაბამისად, სიხშირის კვადრატის პროპორციული ძვრის მოდულის ამაღლება 8-12 % -ით.

ძვრის მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობის ამაღლება შესაძლებელია გამოწვეულია დისლოკაციების მერხევი სეგმენტებისა და ღუნვების ბლოკირებით წერტილოვანი დეფექტებით გამდიდრებულ ატმოსფეროებში.

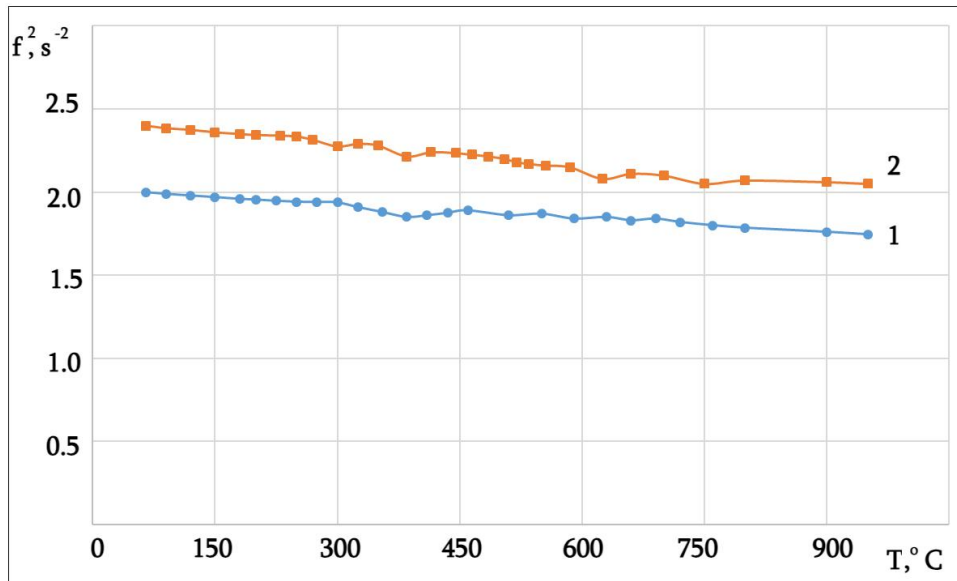
$5 \cdot 10^{16}$ სმ^{-2} ფლუენსის გამა ფოტონებით დასხივება მკვეთრად ზრდის შინაგანი ხახუნის ექსპონენციალური ფონის ინტენსივობას, სუსტად ამაღლებს საწყისი მდგომარეობისათვის დამახასიათებელი ოთხივე რელაქსაციური მაქსიმუმის ტემპერატურას, მნიშვნელოვნად ზრდის მათ ინტენსივობას და განაპირობებს ახალ, დამატებითი მაქსიმუმის ფორმირებას 300°C ტემპერატურის მახლობლობაში (ნახ.1.2). დამატებითი მაქსიმუმისათვის დამახასიათებელია ინტენსივობის სუსტი ამპლიტუდური დამოკიდებულება ამპლიტუდური დეფორმაციის შედარებით დაბალ მნიშვნელობებზე (10^{-5} - 10^{-4}), მაქსიმუმის ტემპერატურის სიხშირული დამოკიდებულება, რაც ავლენს მის რელაქსაციურ ბუნებას. ახალი მაქსიმუმი დაკავშირებულია გამა რადიაციით ფორმირებულ რადიაციულ დეფექტებთან, სახელდობრ, ისეთ რადიაციულ ცენტრებთან რომლებიც იმყოფებიან დისლოკაციების გარემომცველ ე.წ. კოტრელის ატმოსფეროსა და უშუალოდ ბირთვების მახლობლობაში. ყოველივე აღნიშნული განაპირობებს ახალი, რელაქსაციური მაქსიმუმის ინტენსივობის სუსტ ამპლიტუდურ დამოკიდებულებას. ცხრილში 2 წარმოდგენილია გამა ფოტონებით დასხივებული ნიმუშის მახასიათებელი რელაქსაციური შინაგანი ხახუნის პროცესების აქტივაციური პარამეტრებისა და ძვრის დინამიური მოდულის მნიშვნელობები, საიდანაც ჩანს, რომ სიხშირის ფაქტორის მნიშვნელობები განაწილებულია 10^{10} - 10^{12} წმ⁻¹ ინტერვალში. მისი ასეთი მაღალი სიდიდეები

დამახასიათებელია რელაქსაციურ პროცესებში მონაწილე ცენტრების ძლიერი ლოკალიზაციისათვის.

გამა ფოტონებით დასხივებული SiGe შენადნობის შინაგანი ხახუნის რელაქსაციური მაქსიმუმი 300°C ტემპერატურის არეში თავისი აქტივაციური პარამეტრებით პრაქტიკულად იდენტურია ასეთივე მაქსიმუმის, რომელიც ვლინდება მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებული $Si_{1-x}Ge_x$ ($x \leq 0,2$) შენადნობის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურულ სპექტრებში. აღნიშნულ პირობებში ფორმირებულ მაქსიმუმს ასევე ახასიათებს ამპლიტუდური დამოკიდებულება. ყოველივე აღნიშნული მოწმობს იმას, რომ ორივე სახეობის რადიაციული დასხივებით განპირობებული რელაქსაციური პროცესი 300°C ტემპერატურის არეში დაკავშირებულია იდენტური შედგენილობისა და კონფიგურაციის რადიაციული ცენტრებისა და დისლოკაციების ურთიერთქმედებასთან.

საწყის, დაუსხივებელ მდგომარეობაში ტემპერატურის 380-300°C ტემპერატურულ ინტერვალში ფიქსირებულია ბაქანის ფორმის მაქსიმუმის კვალი. კრისტალიზაციის პროცესში Si-Ge შენადნობის კრისტალურ მესერში ფორმირდებიან თერმული წარმოშობის, ტექნოლოგიური მინარევების შემცველი კომპლექსები დისლოკაციების ირგვლივ არსებულ კოტრელის ატმოსფეროში, რომლებიც თავისი შედგენილობით, კონფიგურაციითა და ზომებით ემთხვევიან რადიაციით წარმოქმნილ რელაქსაციის ცენტრებს. მათი რხევითი მოძრაობა გარეშე ძაბვის ველში განაპირობებს ბაქანის ფორმის მაქსიმუმის ფორმირებას დაუსხივებელი ნიმუშის შინაგანი ხახუნის სპექტრში 300°C ტემპერატურის არეში.

თერმული და რადიაციული წარმოშობის წერტილოვანი დეფექტები და მათი კლასტერები ხასიათდებიან განსაზღვრული დიფუზური აქტიურობით, რაც შესაძლებელია გაიზარდოს ტემპერატურის ამაღლების პროცესში. შესაბამისად განხორციელდება დისლოკაციებზე არსებული სეგმენტებისა და ერთეულოვანი და წყვილი ღუნვების ბმის პირობების ცვლილებები როგორც შესუსტების, აგრეთვე გაძლიერების მიმართულებით. ასეთი რთული ხასიათის გადაადგილებები დეფექტების სტრუქტურაში მკაფიოდ არის ასახული სტრუქტურულად-მგრძნობიარე რხევის სიხშირის კვადრატის პროპორციული ძვრის მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულებების გრაფიკზე (ნახ.2). როგორც საწყის, ასევე გამა ფოტონებით დასხივებულ ნიმუშებში ძვრის მოდული ხასიათდება შემცირებით რელაქსაციური მაქსიმუმების ტემპერატურების მახლობლობაში. ძვრის მოდულის მკვეთრი შემცირება ანუ მოდულის დეფექტი შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმის ინტენსივობის პროპორციულია. ძვრის მოდულის ტემპერატურულ სპექტრში მაქსიმუმთა შორის ინტერვალში შეიმჩნევა ზიგზაგისებური ცვლილება მოდულის ზრდისა და შემცირების მონაცვლეობით. მსგავსი ცვლილებები შესაძლებელია განპირობებულია ტემპერატურის ზრდის პროცესში წერტილოვანი დეფექტების დიფუზიით დისლოკაციების მიმართულებით. ამის შედეგად ხორციელდება მათი მოძრაობის შეზღუდვა, ანუ ე.წ. დინამიური მექანიკური განმტკიცება. თერმული და რადიაციული წარმოშობის წერტილოვანი დეფექტების დიფუზური აქტივობის ზრდა შესაძლებელია აგრეთვე დიდი ატომური რადიუსის გერმანიუმის ატომებთან კონცენტრირებული დეფორმაციული ველის გავლენით.



ნახ.2. გამა ფოტონებით დასხივების გავლენა მონოკრისტალური Si+1,5%Ge:P (10^{15} სმ⁻³) შენადნობის ძვრის მოდულის ტემპერატურულ სპექტრზე.

1. საწყისი, $f_0=1,43$ გ.;
2. $5 \cdot 10^{16}$ სმ⁻² ფლუენსის ⁶⁰Co გამა ფოტონებით დასხივებული, $f_0=1,53$ გ.

ამრიგად, ექსპერიმენტულად დადგენილია, რომ $5 \cdot 10^{16}$ სმ⁻² ფლუენსის ⁶⁰Co გამა ფოტონებით დასხივება იწვევს SiGe შენადნობებისათვის დამახასიათებელი დისლოკაციური წარმოშობის რელაქსაციური მაქსიმუმების აქტივაციის ენერჯის სუსტ ზრდას, და დინამიურ მექანკურ განმტკიცებას. შინაგანი ხახუნის სპექტრში 300°C ტემპერატურაზე გამოვლენილია რადიაციული წარმოშობის რელაქსაციური მაქსიმუმი. მისი ინტენსივობა მგრძობიარეა ამპლიტუდური დეფორმაციისადმი. აღნიშნული გარემოება აგრეთვე აქტივაციის ენერჯისა და სიხშირის ფაქტორის შედარებით დაბალი მნიშვნელობები (~1,35 ევ, $5 \cdot 10^{12}$ წმ⁻¹) საფუძველს იძლევიან რელაქსაციის ცენტრად მივიჩნოთ 60-გრადუსიანი კიდური დისლოკაციების გეომეტრიული ღუნვისა და რადიაციული დეფექტის VO (ვაკანსია-ჟანგბადი) კომპლექსი.

რადიაციული წარმოშობის ანალოგიური რელაქსაციური პროცესი გამოვლენილია ასევე Si_{1-x}Ge_x ($x \leq 0,05$) შენადნობში 10^{14} სმ⁻² ფლუენსის მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით და $5 \cdot 10^{12}$ სმ⁻² ფლუენსის ალფა ნაწილაკებით დასხივებულ მდგომარეობაში [8,9]. ორივე ტიპის რადიაციული დასხივება ავლენს SiGe შენადნობების რადიაციულ განმტკიცებასა და დეფორმაციული წარმოშობის შინაგანი ხახუნის რელაქსაციურ მაქსიმუმებთან დაკავშირებული დეფექტების მოძრაობის აქტივაციის ენერჯის ზრდის ტენდენციას.

მიღებულმა ექსპერიმენტულმა შედეგებმა აჩვენეს, რომ რადიაციული დასხივების ფლუენსის ცვლილებით შესაძლებელია SiGe შენადნობების რადიაციული განმტკიცების პროცესების მართვა. ეს მეტად მნიშვნელოვანია Si და SiGe შენადნობების ფუძეზე განსაზღვრული თვისებების ნახევარგამტარული მასალებისა და ხელსაწყოების შექმნისათვის.

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-22-328. n-SiGe შენადნობების ელექტროფიზიკური და არადრეკადი თვისებების

რადიაციით ინდუცირებული ცვლილებების თავისებურებანი“/ „This work was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG) [FR-22-328. Peculiarities of irradiation induced changes of electrophysical and inelastic properties of the monocrystalline n-SiGe alloys]“.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. K.Kinoshita, Y.Arai, T. Maeda, O.Nakatsuka. Si_{1-x}Ge_x bulk single crystals for substrates of electronic devices. J. Materials Science in Semiconductor Processing. 70 (2017) pp.12-17. doi: 10.1016/j.mssp.2016.10.012
2. I.Yonenaga, M.Sakurai, M.H.F.Sluiser, Y.Kawazoe, S.Muto. Atomistic structure and strain relaxation in Czochralski-grown Si_xGe_{1-x} bulk alloys. J. Materials Science:Materials in Electronics 16 (2005) pp. 429-432. doi: 10.1007/s10854-005-2309-1
3. K.Tanaka, M.Suezawa, I.Yonenaga. Photoluminescence Spectra of Deformed Si-Ge alloy. J.Appl. Phys. 80, 12 (1996) pp. 6991-6997
4. J.Weber, M.I.Alonso. Defect Control in Semiconductors, edited by K.Sumino (Elsevier Science, New York, 1990) p.1453.
5. I.Kurashvili, G.Darsavelidze, G.Bokuchava, I.Tabatadze, G.Chubinidze. Influence of Germanium and Boron Doping on Structural and Physical-Mechanical Characteristics of Monocrystalline Silicon . J. International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies. 8, ISSN 1314-7269. (2014). Pp. 298-302.
6. ი.ყურაშვილი, ტ.მელაშვილი, ნ. გოგოლაშვილი, გ.ჩუბინიძე, მ. ქადარია, დ.მხეიძე, გ.დარსაველიძე. მექანიკური პოლირების გავლენა მონოკრისტალური p-SiGe ფუძემრეების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. Georgian Scientists/ ქართველი მეცნიერები, 4 #1, (2022) გვ.65-72. <https://doi.org/10.52340/gs.2022.04.01.07>
7. 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, 539 p.
8. ი.ყურაშვილი, კ.შამათავა, ე.სანაია, გ.ჩუბინიძე, გ.დარსაველიძე. ალფა ნაწილაკებით დასხივების გავლენა შენადნობების p-SiGe ფუძემრეების დინამიურ მექანიკურ თვისებებზე. Georgian Scientists/ ქართველი მეცნიერები, 5, #2, (2023) გვ.63-70. <https://doi.org/10.52340/gs.2023.05.02.08>
9. I. Kurashvili, G. Darsavelidze, T. Kimeridze, I.Tabatadze, T. Melashvili, A. Sichinava, G. Archuadze. Internal friction temperature spectra in electron-irradiated SiGe alloys. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, vol. 13, no. 3, (2019) pp.43-49.

Peculiarities of relaxation internal friction in ^{60}Co gamma photons irradiated monocrystalline SiGe:P alloys

Ia Kurashvili, Giorgi Darsavelidze, Giorgi Chubinidze, David Mkheidze, Marina Kadarua, Nargiza Gogolashvili, Tatiana Melashvili

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

Abstract. Relaxation process caused by the interaction of radiation defects and dislocations is revealed in the internal friction temperature spectrum, in the torsion oscillations frequency range of 1 Hz in the monocrystalline Si+2at.%Ge:P (10^{15}cm^{-3}) alloys irradiated with ^{60}Co gamma photons. A tendency to increase the dynamic shear modulus and activation energy of the deformation origin internal friction relaxation maxima has been experimentally established. The possibilities of controlling the mobility of the dislocations surrounded by thermal and radiation defects are shown based on the increase in the absolute value of the shear modulus and the zigzag changes of temperature. The contribution of radiation defects to the radiation hardening of the test sample is analyzed. The obtained results can be applied in the process of development and creation of materials and devices with specific physical-mechanical characteristics based on SiGe alloys.

Keywords: SiGe alloys, gamma radiation, relaxation, dislocation structure, activation energy, shear modulus.