

რენტგენის ფოტონებით დასხივებული p-ტიპის $\text{Si}_{0,96}\text{Ge}_{0,04}$ შენადნობის არადრეკადი მახასიათებლების ცვლილებათა თავისებურებანი

აკადემიური დოქტორი *ია ჟურაშვილი*
დოქტორანტი *თორნიკე ქიმერიძე*
აკადემიური დოქტორი *იაშა ტაბატაძე*
ფიზიკის მეცნ. კანდიდატი *ლავით მხეიძე*
პროფესორი *გიორგი ღარსაველიძე*

სოხუმის ილია ვეკუას სახ. ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო

მიღებულია 12.11.2018

შესწავლილია $5 \cdot 10^{15} \text{ სმ}^{-2}$ ფლუენსის რენტგენის ფოტონებით დასხივებული, ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული p-ტიპის მსხვილმარცვლოვანი $\text{Si}_{0,96}\text{Ge}_{0,04}$ შენადნობის შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიკური მოდულის ამპლიტუდური დამოკიდებულება. ნაჩვენებია, რომ რენტგენის სხივებით რადიაციული ზემოქმედება იწვევს კრისტალიზაციის პროცესში წარმოქმნილი დეფექტების ქვესისტემის მოდიფიცირებას. $20-400^\circ\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში მოწვეების გავლენით გამოვლინდა დინამიკური მექანიკური განმტკიცების ტენდენცია, რაც განპირობებულია მინარევების ატმოსფეროში არსებული რადიაციული დეფექტების გამსხვილებითა და დისლოკაციების ბლოკირების გაძლიერებით.

საკვანძო სიტყვები: რადიაციული დეფექტები, შინაგანი ხახუნი, ძვრის მოდული, მიკროპლასტიკურობა, მინარევების ატმოსფერო.

სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მოცულობითი კრისტალების მექანიკური თვისებების მიზანმიმართული ცვლილებების ეფექტური განხორციელება შესაძლებელია მათი დამახასიათებელი დისლოკაციური სტრუქტურის კრისტალოგომეტრიული და ენერგეტიკული პარამეტრების მართვით. მინარევების ატმოსფეროების შედგენილობისა და კონფიგურაციის ცვლილებებში მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვთ პირველად რადიაციულ დეფექტებს, კერძოდ, ვაკანსიებს. ვაკანსიებისა და მინარევების ატომების ურთიერთ-ქმედებით წარმოქმნილ კომპლექსებში კონცენტრაციული და კონფიგურაციული გარდაქმნები განაპირობებენ დისლოკაციების ძვრადობის ცვლილებებს ფართო საზღვრებში. ასეთ პირობებში ვლინდება სილიციუმ-გერმანიუმის კრისტალების მექანიკური სიმტკიცისა და მიკროპლასტიკურობის მართვის შესაძლებლობები.

ნაშრომებში [1-3] ნაჩვენებია, რომ თერმული დაბეჭდვითა და მექანიკური დეფორმაციით განპირობებული წერტილოვანი და დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტები იწვევენ Si-xGe_x ($x \leq 0,05$) მოცულობითი კრისტალების დინამიკური მექანიკური თვისებების მკვეთრ ცვლილებებს. ნაშრომებში [4-6] შესწავლილია მონოკრისტალურ Si-Ge შენადნობებში Ge-ის შედგენილობის ცვლილებისა და დისლოკაციური სტრუქტურის გავლენა ძვრის მოდულისა და რელაქსაციური და პისტერეზისული შინაგანი ხახუნის მახასიათებლებზე.

განსაზღვრულია Ge-ის სხვადასხვა შედგენილობის Si-Ge შენადნობებში დისლოკაციური შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმების აქტივაციური მახასიათებლები. გაანალიზებულია Ge-ს კონცენტრაციის ზრდის პირობებში მიკროპლასტიკური დეფორმაციის გამოვლინების კრიტიკული ტემპერატურისა და ამპლიტუდური დეფორმაციის შემცირების მიზეზები. დადგენილია შინაგანი ხახუნისა და ტრადიციული მექანიკური მეთოდებით განსაზღვრული [7-9] Si-Ge შენადნობების მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი. მიუხედავად მაღალი მგრძნობიარობისა და შესაძლებლობებისა, შინაგანი ხახუნის მეთოდები სათანადო სისრულით არ არის გამოყენებული Si-Ge შენადნობების სტრუქტურულად-მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევებში.

უკანასკნელ წლებში შესრულდა Si-Ge შენადნობებში რადიაციით ფორმირებული დეფექტების მახასიათებლების მეტად საინტერესო კვლევითი სამუშაოები [10-12]. კერძოდ, შესწავლილია ვაკანსია-ჟანგბადის კომპლექსების სტრუქტურა და ელექტრონული თვისებები. გაანალიზებულია Si-O-Si და ვაკანსია- O-Ge კომპლექსების თერმული მდგრადობა და ელექტრონული თვისებების კანონზომიერებანი. მეტად მწირია მონაცემები Si-Ge შენადნობების მექანიკური თვისებების ფორმირებასა და ცვლილებებში. პრაქტიკულად შეუსწავლელია რადიაციული დეფექტების გავლენა Si-Ge შენადნობების სტრუქტურაში აკუსტიკური რხევების მიღწევის რელაქსაციურ და ჰისტერეზისულ პროცესებზე.

წინამდებარე ნაშრომში შესწავლილია საწყისი და რენტგენის ფოტონებით დასხივებული მსხვილმარცვლოვანი p-ტიპის $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ შენადნობის პოლირებული ფუძეშრების ძერის დინამიკური მოდულისა და გრეხითი რხევების მიღწევის პროცესები. საცდელი ნიმუშები მიღებულია ჩოხრალსკის მეთოდით. მათ სტრუქტურაში ჟანგბადის ატომების კონცენტრაცია შეადგენს 10^{18} სმ⁻³. საკვლევ $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ შენადნობში Ge-ს კონცენტრაცია არის ზღვრული, რომლის ზემოთ თავს იჩენს Ge-ს ატომებს შორის ურთიერთქმედება და იზრდება უჯრედოვანი სტრუქტურის ფორმირების ალბათობა. 1-2 მმ სისქის ფირები გამოჭრილია ალმასის დისკზე კრისტალის ზრდის მიმართულების მართობულ სიბრტყეებზე. ქიმიური და მექანიკური დამუშავების კომბინირებული სტანდარტული მეთოდებით მიღებული იქნა მაღალი ხარისხით ორმხრივ-პოლირებული ნიმუშები. რადიაციული ზემოქმედებისა და შემდგომი კვლევების განსახორციელებლად დამზადდა სხვადასხვა ფორმის ნიმუშები ზომებით: $4 \times 4 \times 0,5$ მმ; $1,5 \times 20 \times 0,5$ მმ.

რენტგენის სხივების რადიაცია განხორციელდა DRON-3 ტიპის დიფრაქტომეტრზე სპილენძის ანოდის მილაკიდან. საექსპოზიციო დოზა შეადგენდა $5 \cdot 10^{15}$ ფოტონი/სმ². საწყისი და რენტგენის ფოტონებით დასხივებული ნიმუშების მეტალოგრაფიული კვლევა შესრულდა NMM-8RF/TRF სისტემის ოპტიკურ მიკროსკოპზე. გრეხითი რხევების მიღწევის ლოგარითმული დეკრემენტისა და სიხშირის კვარდატის განსაზღვრა შესრულდა ვაკუუმში (10^{-4} ტორი) ფიქსირებულ ტემპერატურებზე სიხშირის 0,5-5,0 ჰც და

ამპლიტუდური დეფორმაციის 10^{-5} - $5 \cdot 10^{-3}$ დიაპაზონებში. გრეხითი რხევების პროცესში ამპლიტუდური დეფორმაცია განისაზღვრა როგორც შებრუნებული ქანქარის ვერტიკალურ ღერძზე დამაგრებული ნიმუშის გრეხვის კუთხე:

$$\varepsilon = \frac{r \cdot L}{l \cdot R},$$

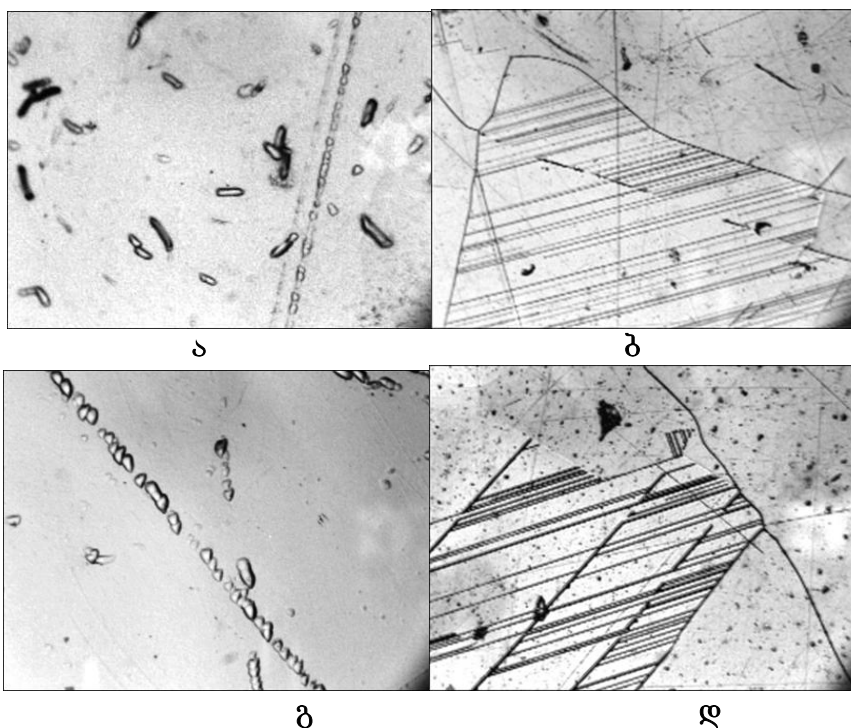
სადაც l არის ნიმუშის სიგრძე; R -მანძილი ნიმუშიდან სარეგისტრაციო სკალამდე; L - ნიმუშის ზედაპირზე განთავსებული სარკიდან არეკლილი სხივის გადახრა პორიზონტალურ სარეგისტრაციო სკალაზე. ამპლიტუდური დეფორმაციის განსაზღვრის ცდომილება არ აღემატება 10%. შინაგანი ხახუნის განსაზღვრა ფორმულით [13]:

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

სადაც n წარმოადგენს რხევათა რაოდენობას, რომელიც შესრულდარხევის ამპლიტუდის A_m -დან A_{m+n} -მდე შემცირების პროცესში. შინაგანი ხახუნის განსაზღვრის ცდომილება არ აღემატება 5%-ს.

p-ტიპის $\text{Si}_{0.98}\text{Ge}_{0.02}$ შენადნობის პოლირებული ნიმუშის მეტალოგრაფიულმა კვლევამ გამოავლინა მსხვილმარცვლოვანი სტრუქტურა. მასში ქაოსურად არიან განაწილებული სხვადასხვა ზომისა და ფორმის მოწამვლის ორმოები. მათი უმრავლესობა „არაკრისტალოგრაფიული“ დეფექტია. ისინი ფორმირებულია ლოკალიზებული დეფექტების ამოწამვლით ქიმიური პოლირების პროცესში (ნახ. 1,ა). ასევე გამოვლენილია სხვადასხვა სისქის დეფორმაციის ხაზებში განთავსებული მცირე ზომის ნათელი და ბნელი ფიგურები. შესაძლებელია ისინიდაკავშირებულია ნიმუშის ზედაპირზე წარმოჩენილ დისლოკაციებთან. მსხვილი მარცვლების შიდა სტრუქტურაში გამოვლენილია წყობის დეფექტების სიმრავლეები. ისინი დეკორირებულია მინარევების კომპლექსებითა და დისპერსული ფაზების ჩანართებით (ნახ. 1,ბ). ამავე ნახაზზე წარმოდგენილია ასევე უწესრიგოდ განაწილებული მოწამვლის ორმოები, რომლებიც განეკუთვნებიან „არაკრისტალოგრაფიულ“ დეფექტებს. $5 \cdot 10^{15} \text{ სმ}^{-2}$ საექსპოზიციო ფლუენსის რენტგენის რადიაციით საკვლევი ნიმუშის მიკროსტრუქტურაში არსებითიცვლილებები არ ხორციელდება. დასხივების შემდეგ კვლავ ფიქსირდება საწყისი სტრუქტურის დამახასიათებელი „არაკრისტალოგრაფიული“ და დისლოკაციური წარმოშობის მოწამვლის ორმოები. ნახ.1,გ-ზე წარმოდგენილია უწესრიგოდ და მწკრივებში განაწილებული მოწამვლის ნათელი ფიგურები. რენტგენის ფოტონებით დასხივებული ნიმუშების მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილი იქნა მიკროორეულებისა და წყობის დეფექტების სიმრავლეები. ისინი შეიცავენ მრავალრიცხოვან მცირე ზომის ნათელ და ბნელ ფიგურებს. დისლოკაციური წარმოშობის ბრტყელი დეფექტები ვრცელდებიან მარცვლების გამყოფ საზღვრებამდე, დისპერსულ ჩანართებთან და ასევე ურთიერთგადაკვეთის არეებში (ნახ. 1, დ).

მეტალოგრაფიული კვლევის თანახმად, მსხვილმარცვლოვანი $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ შენადნობის სტრუქტურა შეიცავს დისლოკაციებს, წერტილოვანი დეფექტების კომპლექსებსა და დისპერსულ ჩანართებს კრისტალის მოცულობასა და წრფივი და ბრტყელი დისლოკაციური დეფექტების მახლობლობაში. აღსანიშნავია ისიც, რომ რადიაციის ფლუენსი შედარებით დაბალია და მისი ზემოქმედებით შესაძლებელია ჩამოყალიბდეს მხოლოდ წერტილოვანი რადიაციული დეფექტები და მათი უმარტივესი კომპლექსები. მოსალოდნელია ასევე $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ შენადნობის კრისტალიზაციის პროცესში ფორმირებული დისლოკაციების ატმოსფეროების მოდიფიცირება წერტილოვანი რადიაციული დეფექტებით. წარმოდგენილი მოსაზრების დასადასტურებლად განხორციელდა ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო ინტერვალში მსხვილმარცვლოვანი $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ შენადნობის შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიკური მოდულის კვლევა საწყის და რენტგენის ფოტონებით დასხივებულ მდგომარეობაში.



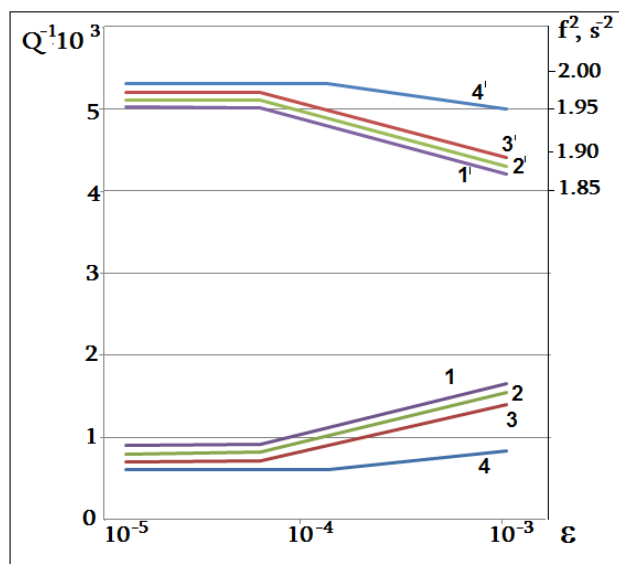
ნახ. 1. p-ტიპის $\text{Si}+4\text{at.\%Ge}$ მსხვილმარცვლოვანი შენადნობის მიკროსტრუქტურა:
 ა - საწყისი მდგომარეობა, ნაჩვენებია არაკრისტალოგრაფიული დეფექტები;
 ბ - საწყისი მდგომარეობა, გამოვლენილია დისპერსული ფაზების ჩანართები;
 გ - დასხივებული, გამოვლენილია მოწამვლის დისლოკაციური ორმოების მწკრივები;
 დ - დასხივებული, გამოვლენილია მოწამვლის დისლოკაციური ორმოები და დისპერსული ფაზები მიკროორეულებსა და წყობის დეფექტებში

ოთახის ტემპერატურაზე შინაგანი ხახუნის $Q^{-1}(\epsilon)$ ინტენსივობა ამპლიტუდური დეფორმაციის ფართო დიაპაზონში პრაქტიკულად უცვლელია. ფარდობითი დეფორმაციის $8 \cdot 10^{-5}$ მნიშვნელობიდან იწყება მისი წრფივი ხასიათის ზრდა. ამპლიტუდური დეფორმაციის $1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$ ინტერვალში შინაგანი ხახუნის ცვლილება შექცევადია. მოწვა ვაკუუმში (10^{-4}

ტორი) 200, 300 და 400°C ტემპერატურებზე 1 სთ-ის განმავლობაში პრაქტიკულად გავლენას არ ახდენს კრიტიკული დეფორმაციის სიდიდეზე. 400°C ტემპერატურაზე მოწვის შემდეგ შეინიშნება მაღალიამპლიტუდების არეში ($\epsilon > 10^{-4}$) Q^{-1} (ϵ) წრფის დახრილობის უმნიშვნელო შემცირება.

საწყისი $Si_{0.96}Ge_{0.04}$ შენადნობის ძვრის მოდულის პროპორციული გრესითი რხევების სიხშირის კვადრატი $F^2(\epsilon)$ კრიტიკულ ამპლიტუდურ დეფორმაციამდე ($\sim 8 \cdot 10^{-5}$) უცვლელია. მისი სუსტი წრფივი შემცირება დაიბიძგება ამპლიტუდური დეფორმაციის მაღალ დიაპაზონში ($\epsilon > 8 \cdot 10^{-5}$). თანმიმდევრული თერმული მოწვები 200 და 300°C ტემპერატურებზე 1 სთ-ის განმავლობაში გავლენას არ ახდენს ძვრის მოდულის ცვლილების ხასიათზე. მაღალ გრესით დეფორმაციებზე შეიმჩნევა ძვრის მოდულის წრფივი შემცირების ტენდენციები.

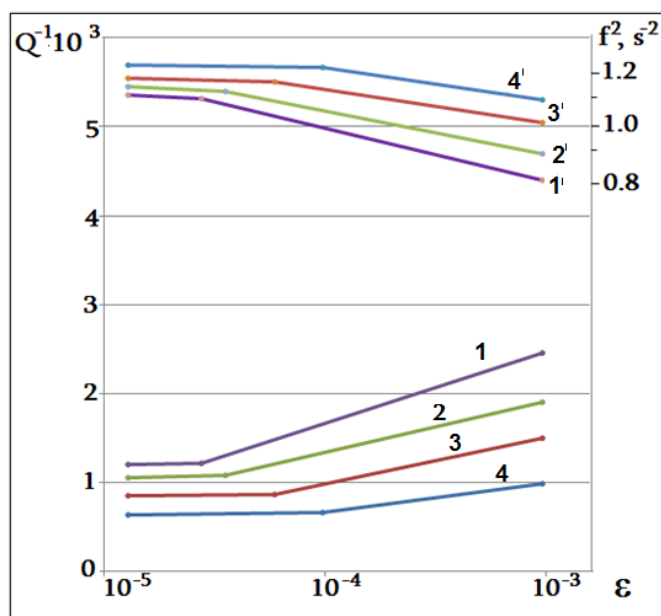
რენტგენის ფოტონებით დასხივებული $Si_{0.96}Ge_{0.04}$ შენადნობის შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ამპლიტუდურ დამოკიდებულებებზე გამოვლენილია შემდეგ თავისებურებანი. შინაგანი ხახუნის ამპლიტუდურ დამოკიდებულებაზე ჩნდება დეფორმაციისკრიტიკული მნიშვნელობა, რომლის ზედა დიაპაზონში ადგილი აქვს გრესითი რხევების გაბნევის ინტენსივობის სუსტ წრფივ ამაღლებას (ნახ. 2). კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაცია ამაღლებულია $2 \cdot 10^{-4}$ -მდე, ეს ავლენს დასხივებით განპირობებული დისლოკაციების ბმების გაძლიერებასა და მასალის სიმტკიცის ზრდას. საეარაუდოა, რომ წერტილოვანი რადიაციული დეფექტები ფორმირდებიან როგორც კრისტალის მოცულობაში, ასევე დისლოკაციების ბირთვებთან არსებულ ატმოსფეროებში და იწვევენ მის გამდიდრებას.



ნახ. 2. თერმული მოწვის გავლენა მსხვილმარცვლოვანი $Si_{0.96}Ge_{0.04}$ შენადნობის შინაგანი ხახუნისა (1-4) ძვრის მოდულის ($1'-4'$) ამპლიტუდურ დამოკიდებულებაზე:

1,1' - საწყისი, $f^2=1,96$ წმ²; 2,2' - მომწვარი, 200°C 1სთ. $f^2=1,965$ წმ²; 3,3' - მომწვარი, 300°C, 1სთ. $f^2=1,97$ წმ²; 4,4' - მომწვარი, 400°C, 1სთ. $f^2=1,98$ წმ²

მოწვა ვაკუუმში 200°C ტემპერატურაზე 10-15% ამცირებს შინაგანი ხახუნის ინტენსივობას დაბალი ამპლიტუდების დიაპაზონში ($\epsilon < 2 \cdot 10^{-4}$). ასევე ვლინდება კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის სუსტად ამაღლება. შინაგანი ხახუნის ამპლიტუდური დამოკიდებულების ცვლილებები უფრო მკაფიოდ არის წარმოჩენილი 300°C ტემპერატურაზე 1 სთ-ის განმავლობაში მომწვარ მდგომარეობაში. 400°C ტემპერატურაზე მოწვით კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაცია იზრდება საწყისი შენადნობისათვის დამახასიათებელ კრიტიკულ სიდიდემდე. დასხივებული ნიმუშის ძვრის მოდულის ამპლიტუდური დამოკიდებულება დეფორმაციის ფართო ინტერვალში წრფივია, კრიტიკულ წერტილამდე ის პრაქტიკულად უცვლელია, ხოლო დეფორმაციის მაღალი ამპლიტუდების დიაპაზონში წრფივად მცირდება. ძვრის მოდულის წრფივი ცვლილება შენარჩუნებულია 200 , 300 და 400°C ტემპერატურებზე თერმულად მომწვარ მდგომარეობაში. ასეთ პირობებში ძვრის მოდულის ამპლიტუდურ დამოკიდებულებაზე შეინიშნება კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის ამაღლება დაუსხივებელი ნიმუშისათვის დამახასიათებელ მნიშვნელობამდე. $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ შენადნობის ამპლიტუდური დეფორმაციის კრიტიკულ მნიშვნელობებზე რენტგენის ფოტონებით დასხივებისა და თერმული მოწვის გავლენის შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში.



ნახ. 3. რენტგენის ფოტონებით დასხივებული მსხვილმარცვლოვანი $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ შენადნობის შინაგანი ხახუნისა (1-4) ძვრის მოდულის (1'-4') ამპლიტუდური დამოკიდებულება:

1,1' - საწყისი; 2,2' - მომწვარი, 200°C , 1სთ; 3,3' - მომწვარი, 300°C , 1სთ;

4,4' - მომწვარი, 400°C , 1სთ $\nu=1,1\mu\text{C}$

Si_{0,96}Ge_{0,04} შენადნობის ამპლიტუდური დეფორმაციის კრიტიკული სიდიდეები ცხრილი

p-ტიპის მსხვილმარცვლოვანი Si _{0,96} Ge _{0,04}	ნიმუშის მდგომარეობა			
	საწყისი	მომწვარი, 200°C, 1 სთ	მომწვარი, 300°C, 1 სთ	მომწვარი, 400°C, 1 სთ
დაუსხივებელი	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$
რენტგენის ფოტონებით დასხივებული	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$

მიღებული შედეგები მოწმობენ, რომ თერმული მოწვით ხორციელდება რადიაციული დეფექტების კონცენტრაციის შემცირება. შესაბამისად, სრულდება ლოკალურად დარღვეული ატომთაშორისი კავშირების აღდგენა და სიმტკიცის ამაღლება თავდაპირველ დონემდე. კრიტიკული ამპლიტუდური დეფორმაციის ამაღლებისადმი მისწრაფება შესაძლებელია განპირობებულია დისლოკაციების დამუხრუჭებით ვაკანსია-ჟანგბადის (V-O) კომპლექსებით, რომლებიც წარმოიქმნენ რენტგენის ფოტონებით დასხივების პროცესში. Si_{0,96}Ge_{0,04} შენადნობის სტრუქტურულად-მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ცვლილებებში თერმული და რადიაციული წარმოშობის დეფექტების წვლილის მკაფიოდ განცალკევებისათვის აუცილებელია სრულყოფილი მონოკრისტალური ნიმუშების კვლევა საწყისა და მაღალი ფლუენსის რადიაციით დასხივებულ მდგომარეობაში.

ლიტერატურა

1. Бердзенишвили К.С., Дарсавелидзе Г.Ш., Габричидзе Л.Л., Кекуа М.Г. Влияние легирования на свойства окисленного монокристаллического кремния//Неорганические материалы. Т. 33. №11. 1997.
2. Kurashvili I., Sanaia E., Darsavelidze G., Bokuchava G., Sichinava A., Tabatadze I. Physical-mechanical properties of germanium doped monocrystalline silicon//Materials Science and Engineering. A3 (10). 2013.
3. Kurashvili I., Darsavelidze G., Bokuchava G., Tabatadze I.. Influence of germanium and boron doping on structural and physical-mechanical characteristics of monocrystalline silicon. 2014. 8 . ISSN 1314-7269, <http://www.scientific-publications.net.298-302>.
4. Kurashvili I., Sichinava A., Bokuchava G., Darsavelidze G. Physical-mechanical characteristics of monocrystalline Si_{1-x}Ge_x(x≤0,02) solid solution. International Scholarly and Scientific Research and Innovation 9 (7). 2015.
5. Kurashvili I., Darsavelidze G. Mechanical relaxation processes in monocrystalline Si-Ge alloys/ Proceedings of the Conference "Advanced Materials and Technology". 2015.
6. Kurashvili I., Darsavelidze G., Bokuchava G. High-amplitude internal friction in monocrystalline germanium-doped silicon// Phys. Stat. Sol. A 214. No 7. C14. 2017. 1700107.(1-4).
7. Tetsuo Fukuda and Akira Ohsawa. Mechanical strength of silicon crystals with oxygen and/or germanium impurities/ Appl. Phys. Lett. Vol. 60. No 10. 1992.

8. Yonenaga Y. and K. Sumino. Mechanical strength of GeSi alloy// App. Phys. Vol. 80. No 6. 1996.
9. Wang P., Yu X., Li Z., Yang D. Improved fracture strength of multicrystalline silicon by germanium doping//Journal of Crystal Growth 318. 2011.
10. Khirunenko L.I., Pomozov Yu.V., Sosnin M.G., Shinkarenko V.K. Oxygen in silicon doped with isovalent impurities/ Physica B 273-274. 1999.
11. Londos C.A., Sgourou E.N., Hall D., Chroneos A. Vacancy-oxygen defects in silicon: the impact of isovalent doping// Mater. Sci: Mater Electron. 2014. 25.
12. Sgourou E.N., Londos C.A., Chroneos A. Vacancy-oxygen defects in p-type $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ //Appl. Phys. 133502 (1-6). 2014.
13. Blanter M.S., Golovin I., Neuhauser H., Sining H. Internal friction in metallic materials. A handbook Series: Springer Series in Materials Science 90. 2007.