

ინდენტორებით ინდუცირებული სტრუქტურული ცვლილებები ელექტრონებით დასხივებულ ბორით დოპირებულ სილიციუმში

გიორგი დარსაველიძე¹, კახაბერ შამათავა^{1,2}, ავთანდილ სიჭინავა¹, მარინა ქადარია¹,

რომან აბრამიშვილი¹

1. სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი

2. სოხუმის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

განხორციელებულია მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებული ბორით ლეგირებული მონოკრისტალური სილიციუმის (111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის ფუძემდებლის მიკროსტრუქტურის, ელექტროფიზიკური თვისებებისა და ულტრამიკროინდენტორების პროცესებში სტრუქტურული ფაზური გარდაქმნების კომპლექსური კვლევა.

ნაჩვენებია, რომ p-Si-ის (111) სიბრტყეებზე $\approx 10^{13}$ სმ⁻² ფლუენსის 12მეგ ენერგიის ელექტრონებით დასხივება იწვევს კუთრი ელექტროწინაღობის ~ 3 -ჯერ და დენის მატარებელი ხვრელების ძვრადობის 20%-ით შემცირებას. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებული ნიმუშების ინფრაწითელი გამოსხივების შთანთქმის სპექტრში გამოვლენილია ჟანგბადისა და ნახშირბადის კონცენტრაციის 2.5-3-ჯერ შემცირება.

საკვლევი ნიმუშების ელექტრონებით დასხივებული (111) სიბრტყეებზე ვიკერსის ინდენტორით ინდენტორების პროცესებში დატვირთვა-გადაადგილების გაზომვებით ნაჩვენებია დრეკადობის მოდულისა და სილიციუმის არასტაბილურ ფაზებში გარდაქმნების მახასიათებელი საშუალო საკონტაქტო წნევის სუსტი ზრდა. განხილულია ბორით დოპირებულ სილიციუმში ელექტრონული რადიაციით მოდიფიცირებული დისლოკაციების ატმოსფეროების წვლილი ელექტროფიზიკური თვისებებისა და ინდენტორების პროცესებში განხორციელებულ სტრუქტურულ-ფაზური ცვლილებების მახასიათებლებში. გაანალიზებულია მონოკრისტალურ p-Si : B ნიმუშებში ელექტრონების რადიაციით ინდუცირებული დისლოკაციური სტრუქტურის ატმოსფეროების მოდიფიცირებასთან

დაკავშირებული დინამიური მექანიკური და ელექტროფიზიკური თვისებების ვარიაციის მიზეზები.

საკვანძო სიტყვები: p-ტიპის სილიციუმი, მაღალენერგეტიკული ელექტრონები, ვიკერსის ინდენტორი, დრეკადობის მოდული, საკონტაქტო წნევა, ელექტროწინაღობა, ხვრელების ძვ

შესავალი

p-ტიპის სილიციუმის კომპლექსური კვლევების მიზანშეწონილობას განაპირობებს თანამედროვე ნახევარგამტარულ ხელსაწყოებში მათი ფართოდ გამოყენება. კონცენტრაციის ფართო დიაპაზონში ბორით დოპირებული მონოკრისტალური სილიციუმი გამოიყენება P/P⁺ ეპიტაქსიური ფენების ფუძემდებლად დიდი ინტეგრალური სქემების ხელსაწყოებში, აგრეთვე მოწამვლის ჩამკეტად (as etch stop) მიკროტექნიკური ხელსაწყოების წარმოებაში [1]. ბორით დოპირება ეფექტურად აბრკოლებს დისლოკაციების აქტიურობას სილიციუმის კრისტალურ მესერში. შესაბამისად მალდება მასალის მედეგობა დიდი მექანიკური ძაბვების მიმართ დისლოკაციების გენერაციის წინა პერიოდში [2]. უკანასკნელი ორი ათწლეული ხასიათდება მონოკრისტალურ სილიციუმში მიკრო/ნანო ინდენტაციით ინდუცირებული სტრუქტურული ფაზური გარდაქმნების ინტენსიური ექსპერიმენტული და თეორიული კვლევებით. განხორციელდა მრავალმხრივი კვლევითი სამუშაოები ინდენტირების პროცესებში დატვირთვა-გადაადგილების დამოკიდებულებებზე სტრუქტურულ ცვლილებებთან დაკავშირებული გადახრების გამოვლენისა და მართვისათვის [3]. სისტემატურმა ექსპერიმენტულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ მეტად წამახული ვიკერსისა და ბერკოვიჩის ინდენტორებით დატვირთვის პროცესში ე.წ. “pop-in” შემთხვევების გამოვლინება იშვიათად ხდება. მეტად სპეციფიკურ პირობებში (ინდენტორზე მაღალი დატვირთვა, დატვირთვის ცვლილების დაბალი სიჩქარე) შესაძლებელი შეიქმნა სილიციუმსა და გერმანიუმში ფაზურ გარდაქმნებთან დაკავშირებული “pop-in” შემთხვევების გამოვლინება [4,5].

სილიციუმის ინდენტირების განტვირთვის ეტაპზე ე.წ. “pop-out” შემთხვევების გამოვლინება მიაჩნდება Si-II → Si-III/Si-XII ფაზური გარდაქმნის დასაწყისზე [5]. ფაზური გარდაქმნების მარშრუტი მნიშვნელოვნად განისაზღვრება ინდენტორის განტვირთვის სიჩქარით [2]. “pop-out” შემთხვევების მახასიათებელი საკონტაქტო წნევა სილიციუმისათვის მერყეობს ფართო საზღვრებში (3.5-12 კპა). მასზე გავლენას ახდენს ნიმუშის სტრუქტურის დეფორმაცია, ატომთაშორისი სავალენტო კავშირების რღვევა, სტრუქტურული დეფექტების კონცენტრაცია და განაწილება კრისტალურ მესერში [3,5]. სილიციუმში კოვალენტური კავშირების რღვევა ეფექტურად შესაძლებელია განხორციელდეს ბორით ლეგირების შემთხვევაში. Si:B ნიმუშის სტრუქტურაში დენის მატარებელი ხვრელების ფორმირება ატომთაშორისი კავშირების გაწყვეტით სრულდება [6]. ატომთაშორისი სავალენტო ბმების ნაწილობრივი რღვევა გავლენას ახდენს სტრუქტურული დეფექტების ჩასახვისა და მოძრაობის აქტივაციის პირობებზე. მათი მიზანმიმართული ცვლილებებით შესაძლებელია

სტრუქტურულად მგრძობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მართვა და პროგნოზირება.

ნაშრომში შესწავლილა მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივების გავლენა ვიკერსის მეთოდით ინდენტირებით ინდუცირებულ სტრუქტურულ ფაზურ გარდაქმნებზე (111) ორიენტაციის ბორით დოპირებულ მონოკრისტალურ სილიციუმში.

კვლევის ობიექტი და მეთოდი

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული 10^{15}სმ^{-3} კონცენტრაციის ბორით დოპირებული მონოკრისტალური სილიციუმის (111) ორიენტაციის ფუძემრეები. მათი ორმხრივი პოლირების ბოლო ეტაპზე განხორციელდა ულტრაბგერით დამუშავება აცეტონში 20 წთ-ის განმავლობაში. ამის შემდეგ ნიმუშები 30წთ დაყოვნდა 5%HF-ში ზედაპირებზე ოქსიდური ფენების მოსაშორებლად, ბოლო ეტაპზე ნიმუშები გაირეცხა დეიონიზებულ წყალში. მიკროსტრუქტურის კვლევა შესრულდა NMM-80 RF/TRF სისტემის მეტალოგრაფიულ მიკროსკოპზე. ელექტროფიზიკური მახასიათებლები განისაზღვრა ვან დერ პოს მეთოდით 0.5 ტესლა ინდუქციის მუდმივ მაგნიტურ ველში Ecopia HMS-3500 სისტემის დანადგარზე. ინფრაწითელი გამოსხივების ტალღის სიგრძის 3-28 მკმ დიაპაზონში, ოპტიკური შთანთქმის სპექტრების მიღება განხორციელდა Cary 600 FTIR სპექტრომეტრზე. ინდენტირების ექსპერიმენტები შესრულდა ვიკერსის მეთოდით Shimadzu DUH – 211S ულტრამიკროტესტერზე ჰაერის ნორმალური წნევისა და ოთახის ტემპერატურის პირობებში. ინდენტორის დატვირთვისა და ნიმუშის სიღრმეში შეღწევის რეგისტრაცია სრულდებოდა დატვირთვა-განტვირთვის პროცესებში. ყოველ მაქსიმალურ დატვირთვაზე დაყოვნების დრო შეადგენდა 10 წმ. ინდენტორის განტვირთვის ბოლო სტადიაზე დატვირთულ მდგომარეობაში დაყოვნება შეადგენდა 5 წმ. ინდენტირებით აღძრული საკონტაქტო წნევის საშუალო მნიშვნელობები განისაზღვრა მეთოდით [8], რომელიც დამუშავებულია დრეკადი აღდგენის კონტაქტის მექანიკის თეორიული მოდელების საფუძველზე [9]. 12 მევ ენერგიის ელექტრონებით დასხივება განხორციელდა Varian-ის სისტემის Clinac 2100ix დანადგარზე.

ექსპერიმენტული შედეგები და განსჯა

საწყის მდგომარეობაში p-Si-ის (111) ორიენტაციის ფუძემრეები ხასიათდებიან ერთგვაროვნად განაწილებული ერთნაირი ზომების მოწამვლის დისლოკაციური ფიგურებით. მათი სიმკვრივე იცვლება ($1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$) სმ^{-2} საზღვრებში. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება პრაქტიკულად გავლენას არ ახდენს დისლოკაციების განაწილების ხასიათსა და სიმკვრივეზე. ელექტრონებით დასხივებული (111) სიბრტყეებზე შეიმჩნევა მცირე კონცენტრაციის შედარებით დიდი ზომების დისლოკაციური ფიგურები. მათი ფორმირება ხდება სილიციუმის კრისტალური მესრის დამაბულ არეებში რადიაციული დეფექტების მახლობლობაში.

ინფრაწითელი გამოსხივების ოპტიკური შთანთქმისა და განჭოლვის სპექტრების ანალიზმა აჩვენა ელექტრონებით დასხივებულ ნიმუშებში ტექნოლოგიური მინარევების ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომების კონცენტრაციების შემცირება ჩანერგვისა (Oi) და ჩანაცვლების (Cs) პოზიციებში. ეს გარემოება განპირობებულია ორივე მინარევის ატომების ურთიერთქმედებით პირველად რადიაციულ დეფექტებთან (ვაკანსია, ჩანერგვის პოზიციაში სილიციუმის ატომი Si_i). ოთახის ტემპერატურის პირობებში ინტენსიურად მიმდინარეობს რადიაციული დეფექტების მარტივი კომპლექსების ფორმირება (VO, CiCs, CiOi), რომლებიც იწვევენ ელექტროფიზიკური მახასიათებლების ცვლილებებს. 10^{13}სმ^{-2} ფლუენსის მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებამ გამოიწვია p-Si-ის ფუძემრეების კუთრი ელექტროწინალობისა და დენის მატარებელი ხვრელების კონცენტრაციის შესამჩნევი ცვლილებები. ამდღობული კონცენტრაციის ხვრელები ინტენსიურად განიბნევიან ელექტრულად აქტიურ რადიაციულ დეფექტებზე, რამაც გამოიწვია ძვრადობის 20%-მდე შემცირება. ელექტრონების დასხივების გავლენა p-Si-ის ელექტროფიზიკურ და ოპტიკურ მახასიათებლებზე ასახულია ცხრ. 1-ში.

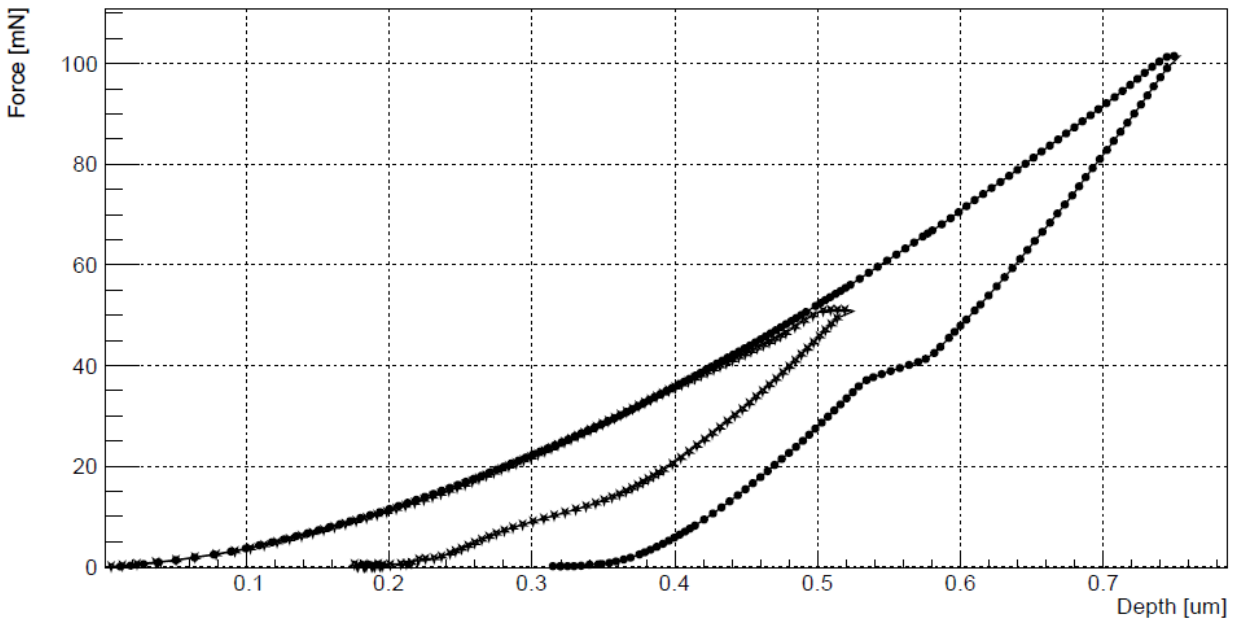
მონოკრისტალური სილიციუმის ელექტროფიზიკური მახასიათებლები

ცხრ.1

p-Si (100)	დისლოკაციების სიმკვრივე, სმ^{-2}	კუთრი ელექტრო- წინალობა, ომი-სმ	ხვრელების კონცენტრაცია, სმ^{-3}	ძვრადობა, $\text{სმ}^2\cdot\text{ვ}^{-1}\cdot\text{წმ}^{-1}$	ჟანგბადის კონცენტრაცია, სმ^{-3}	ნახშირბადის კონცენტრაცია, სმ^{-3}
საწყისი	$3\cdot 10^3$	9,6	$1\cdot 10^{15}$	650	$2\cdot 10^{18}$	$7\cdot 10^{16}$
ელექტრონებით დასხივებული	$4\cdot 10^3$	3,5	$4\cdot 10^{15}$	520	$8\cdot 10^{17}$	$3\cdot 10^{16}$

ნახ.1ზე წარმოდგენილია საწყის ნიმუშზე ინდენტორის დატვირთვა-გადაადგილების გრაფიკები 50 და 100 მნ მაქსიმალური დატვირთვისას.

50 მნ დატვირთვის შემთხვევაში განტვირთვის შტოზე გამოვლენილია დახრილობის მდორე, თანდათანობითი ცვლილება, რაც ვრცელდება ინდენტორის გადაადგილების ფართო დიაპაზონში განტვირთვის პროცესის დასრულებამდე (ნახ. 1).



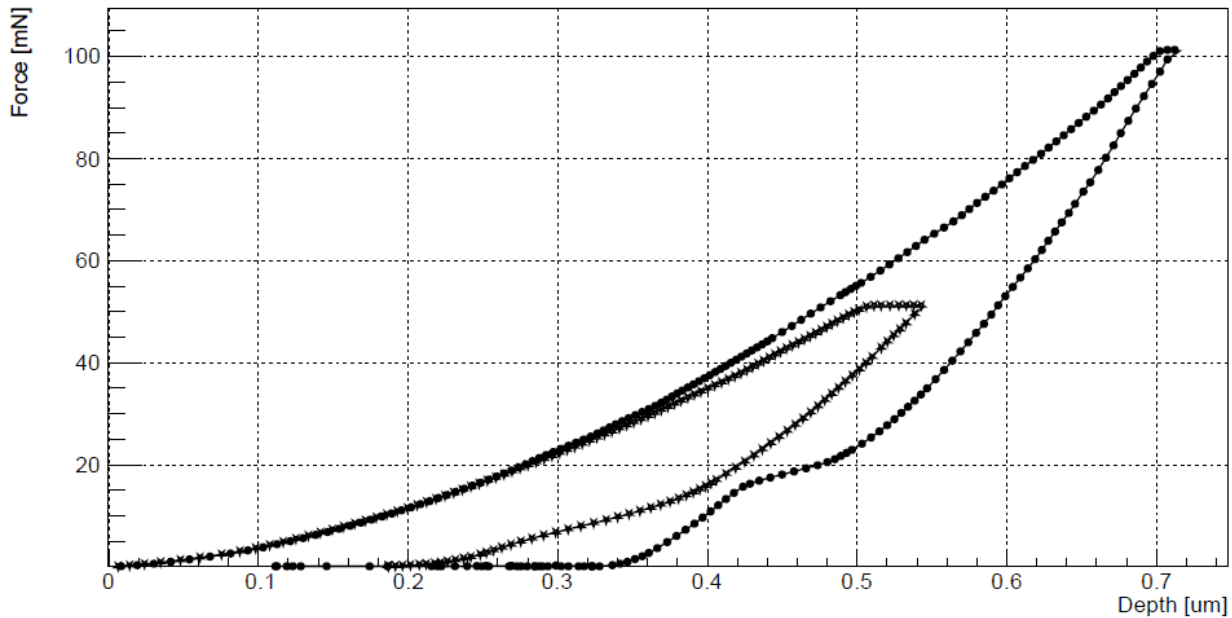
ნახ. 1. საწყისი მონიკრისტალური p-Si:B ფუძეშრის დატვირთვა-გადაადგილების დამოკიდებულება.

----●---- მაქსიმალური დატვირთვა 100მნ.

----*---- მაქსიმალური დატვირთვა 50მნ

ინდენტორზე მოდებული 100მნ მაქსიმალური დატვირთვის შემთხვევაში დატვირთვა-გადაადგილების გრაფიკის განტვირთვის შტოზე ჩნდება დახრილი ბაქანის ფორმის დამატებითი გამრუდება. 100 მნ მაქსიმალური დატვირთვის პირობებში იზრდება კრიტიკული დატვირთვის მნიშვნელობა, რომელზედაც ვლინდება დატვირთვა-გადაადგილების განტვირთვის შტოზე გამრუდება თანმიმდევრულად განთავსებული გადახრითა და ბაქანის ფორმით.

მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებულ Si:B ფუძეშრის ინდენტორების პროცესების მახასიათებელ დატვირთვა-გადაადგილების გრაფიკების განტვირთვის შტოებზე შეინიშნება გამრუდების გაზრდა და ბაქანის მიდამოში დატვირთვის კრიტიკული მნიშვნელობის სუსტი ამაღლება. ეფექტი უფრო მკაფიოდ ჩნდება 100 მნ მაქსიმალური დატვირთვის შემთხვევაში.

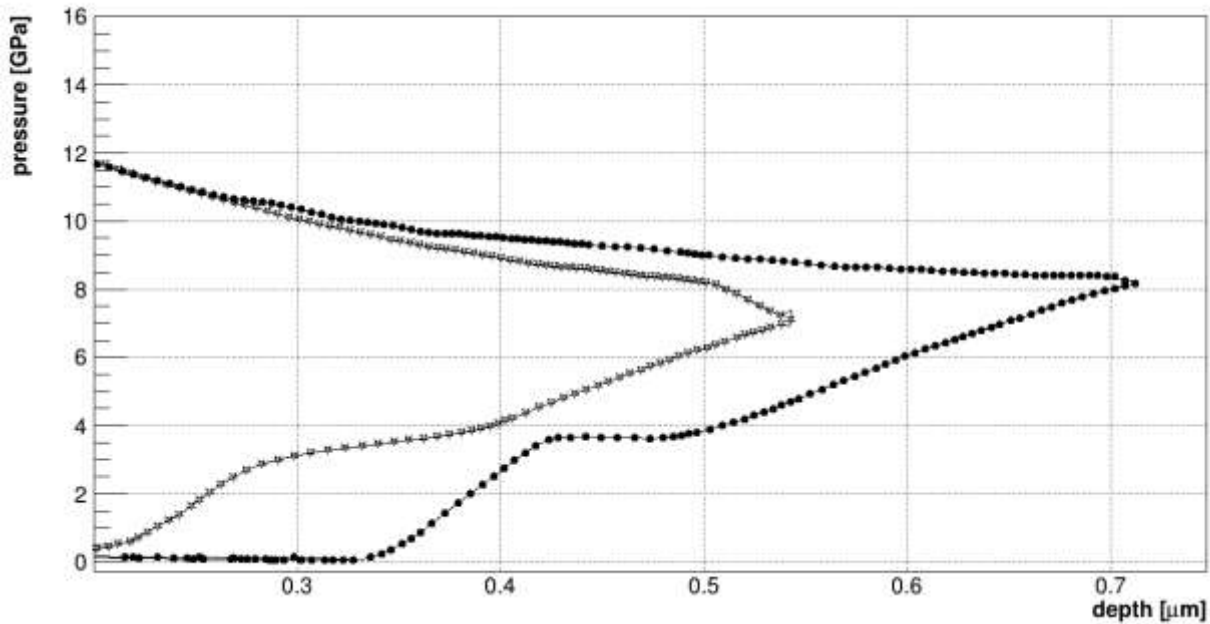


ნახ. 2. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებული p-Si:B ფუძეშრის დატვირთვა გადაადგილების დამოკიდებულება.

----●---- მაქსიმალური დატვირთვა 100მნ.

----*---- მაქსიმალური დატვირთვა 50მნ

საშუალო საკონტაქტო წნევის სიდიდეები ყოველი ექსპერიმენტული დატვირთვისათვის განისაზღვრა სტანდარტული მეთოდით [7]. გაანგარიშებით მიღებული საშუალო საკონტაქტო წნევა- გადაადგილების დამოკიდებულებების განტვირთვის უბანზე 50 მნ მაქსიმალურ დატვირთვაზე არადრეკადი დეფორმაციის ეფექტი წარმოჩენილია იდენტორის გადაადგილების 0.25-0.40 მკმ დიაპაზონში, რომელსაც შეესაბამება საშუალო საკონტაქტო წნევის ცვლილება 3,5-4,0 გპა დიაპაზონში.

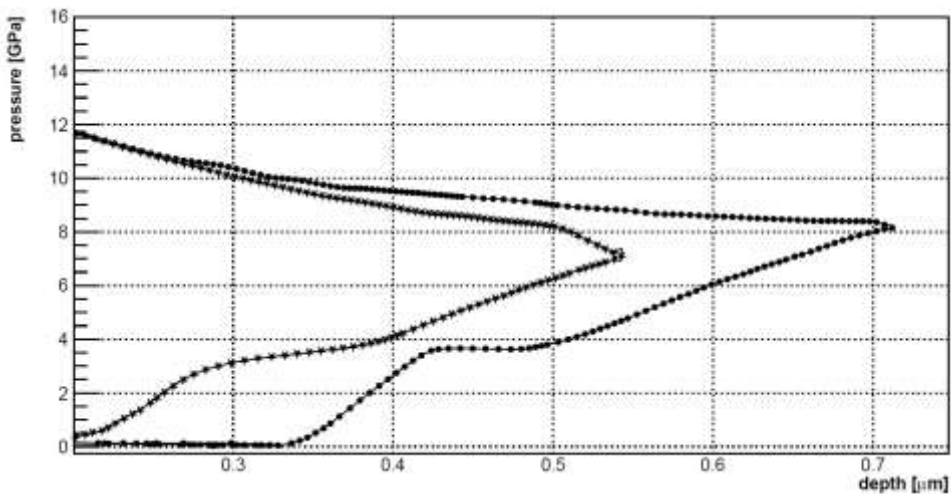


ნახ 3. მონოკრისტალური p-Si-ის საშუალო საკონტაქტო წნევის კონტაქტის სიღრმეზე დამოკიდებულება.

-----●----- მაქსიმალური დატვირთვა 100მნ.

-----*----- მაქსიმალური დატვირთვა 50მნ.

საცდელი ნიმუშის ელექტრონებით დასხივების შემდეგ 100 მნ მაქსიმალური დატვირთვის პირობებში შეიმჩნევა არადრეკადი დეფორმაციის არეში დატვირთვის კრიტიკული მნიშვნელობისა და საშუალო საკონტაქტო წნევის სუსტი მატება (ნახ.4).



ნახ 4. 12 მევ ენერჯის ელექტრონებით დასხივებული მონოკრისტალური p-Si-ის ინდენტორების

პროცესში საშუალო საკონტაქტო წნევის კონტაქტის სიღრმეზე დამოკიდებულება.

----●---- მაქსიმალური დატვირთვა 100მნ.

-----*----- მაქსიმალური დატვირთვა 50მნ.

მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივებას შეუძლია გამოიწვიოს სტრუქტურაში არსებული დისლოკაციური წარმოშობისა და რადიაციული დეფექტების ურთიერთქმედების ძალისა და ძვრადობის ცვლილებები. ეს გარემოება საცდელი ნიმუშის ინდენტორების პროცესებზე 100 მნ მაქსიმალურ დატვირთვაზე წარმოდგენილია ბაქანიტა და ასევე ზუსტად ამაღლებული დატვირთვისა და საშუალო საკონტაქტო წნევის კრიტიკული მნიშვნელობებით.

ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ საცდელი ნიმუშების (111) ზედაპირზე დრეკადობის მოდული სუსტად მცირდება ინდენტორზე მაქსიმალური დატვირთვის ამაღლებით 50 დან 100 მნ-მდე. მაღალ ენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება იწვევს დრეკადობის მოდულის სუსტად მატებას მაქსიმალური დატვირთვის ორივე შემთხვევაში. აღსანიშნავია, რომ ბორით ლეგირებული მონოკრისტალური Si-ის დრეკადობის მოდული ~10%-ით ნაკლებია არალეგირებული მონოკრისტალური სილიციუმის ასეთივე მექანიკურ მახასიათებლებზე პრაქტიკულად ნებისმიერი კრისტალოგრაფიული ორიენტაციისათვის [10]. საცდელი P-Si ნიმუშების სტრუქტურა შეიცავს 10^4 - $5 \cdot 10^4$ სმ⁻² სიმკვრივის დისლოკაციებს, რითაც სუსტდება კრისტალურ მესერში ატომთაშორისი კავშირის ძალები და იქმნება დრეკადობის მოდულის შემცირების პირობები. ეს გარემოება ნათლად არის ასახული ცხრ. 2-ში.

ბორით დოპირებული სილიციუმის მექანიკური მახასიათებლები ინდენტორის განტვირთვის პროცესებში

ცხრ. 2

P-Si (111)	მაქსიმალური დატვირთვა, მნ	დატვირთვა-განტვირთვის სიჩქარე, მნ/წმ	კრიტიკული დატვირთვა, მნ	საშუალო საკონტაქტო წნევა, გპა	დრეკადობის მოდული, გპა
საწყისი	50	13.24	8-10	3.5-4.0	1.76
ელექტრონებით დასხივებული		13.24	12	3.5-4.5	1.83
საწყისი	100	13.24	20-25	4.0-4.5	1.73
ელექტრონებით დასხივებული		13.24	25-30	4.5	1.79

ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებულ მონოკრისტალურ სილიციუმში მაღალია ტექნოლოგიური C და O მინარევების ატომების კონცენტრაცია. ორივე მინარევი გავლენას ახდენს დისლოკაციების ძვრადობაზე. მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება იწვევს რადიაციული დეფექტებით დისლოკაციების გარშემო არსებული ატმოსფეროების გამდიდრებას, რითაც ხორციელდება დისლოკაციური სტრუქტურის ბლოკირება და რადიაციული განმტკიცება. ექსპერიმენტული გაზომვების თანახმად ტექნოლოგიური C და O მინარევების ატომები და რადიაციით მოდიფიცირებული დისლოკაციური სტრუქტურა იწვევენ ინდენტირების პროცესში დრეკადობის მოდულის უმნიშვნელო ცვლილებებს. ინდენტორის განტვირთვის პროცესებში დატვირთვა-გადაადგილების გრაფიკებზე გამოვლენილი მდორე გამრუდება და ბაქანი მაღალი ალბათობით განპირობებულია ფაზური გარდაქმნებით საცდელი ნიმუშების სტრუქტურაში.

ექსპერიმენტული მონაცემების თანახმად ინდენტორზე მოდებული 50 მნ მაქსიმალური დატვირთვის პირობებში დატვირთვა-გადაადგილების დამოკიდებულებების განტვირთვის შტოებზე ვლინდება მხოლოდ მდორე გამრუდება, რომელიც შესაძლებელია დაკავშირებულია სილიციუმის β -კალის მოდიფიკაციიდან ამორფული ფაზური მდგენელის ფორმირებასთან [5]. საწყის მდგომარეობაში და, განსაკუთრებით, მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივების შემდეგ, განტვირთვის შტოზე ჩნდება ბაქანი. ცნობილი მოსაზრებების თანახმად [11] განტვირთვის პროცესში ბაქანის გამოვლინება დაკავშირებულია სილიციუმის β -კალის ფაზის გარდაქმნასთან განსაზღვრული რაოდენობით Si-III და Si-XII კრისტალურ ფაზებად. მეორე ცხრილიდან ჩანს, რომ განტვირთვის გრაფიკზე გამოვლენილი გადახრების კრიტიკული საშუალო საკონტაქტო წნევების მნიშვნელობები შედარებით მცირეა, მაგრამ იმავე რიგისაა, რაც წარმოდგენილია ნაშრომში [12]. საკონტაქტო წნევის შემცირება მნიშვნელოვნად განპირობებულია ბორით დოპირებით, რომლითაც მნიშვნელოვნად სტიმულირდება ინდენტაციის პროცესებში ამორფული ფაზის ფორმირება.

საკვლევი p-Si ნიმუშები სუსტად არიან დოპირებული ბორით. ამის გამო დრეკადობის მოდულისა და საშუალო საკონტაქტო წნევის შემცირება პრაქტიკულად არ არიან დამოკიდებული დენის მატარებელი ხვრელების კონცენტრაციაზე. არსებითი მნიშვნელობა აქვს Si-ისა და B-ის ატომებს შორის არსებულ დიდ განსხვავებას (~28%) და ლოკალიზებულ დეფორმაციას B-ის ატომების მახლობლობაში, სადაც მცირდება Si-ის კრისტალური მესრის დრეკადი დეფორმაცია და იქმნება ამორფული ფაზის ჩასახვის პირობები.

ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ მონოკრისტალური p-Si:B ფუძემდებლების მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივება იწვევს რადიაციულ განმტკიცებას და საკონტაქტო წნევის სუსტად ზრდას. ასეთ პირობებში მოსალოდნელია ფაზური გარდაქმნების პოტენციალური ბარიერის ამადლება. აღნიშნული ცვლილებები განპირობებულია დეფექტების ქვესისტემაში ურთიერთბლოკირების გაძლიერებით. ეს გარემოება შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ინდენტირების პროცესში Si-ის სტრუქტურაში ფაზური გარდაქმნების მართვის შესაძლებლობების დასადგენად.

ლიტერატურა

1. G.Ge., V.Domnich., Y. Gogotsi J.Appl Phys., 93, [2003], 2418-2423
2. Li Chang, Liangchi Zhang. J. Mater Sci. and Engineering, A506 (2009), 125-129.
3. C.R.Das, S.Dhara, Yeau-Ren Yeng, J.Appl. Phys. Letters, 96. (2010), 253113-1-25313-
4. A.Kailer, Y.G.Gogotsi, and K.G.Nickel. J.Appl. Phys. 81,7, (1997), 3057-3063.
5. T.Juliano, V.Domnich, and Y.Gogotsi, J.Mater Res., vol. 19, No 10 (2004), 3099-3108.
6. L.Chang, L.C.Zhang. J.Acta Materialia, 57 (2009), 2148-2153.
7. T.Juliano, Y.Gogotsi, and V.Domnich. J.Mater Res., Vol.18, No5 (2003), 1192-1201.
8. W.C.Oliver and G.M.Pharr. J.Mater. Res., 7. (1992), 1564-1583.
9. N.V.Novikov, S.N.Dub, Y.V.Milman, Y.V.Gridneva, and S,Y.Chugunova. J.Superhard. Mater, Vol.18, No 32 (1996), 1009-1017.
10. R.F.Cook. J.Mater.Sci. 41 (2006), 841-872.
11. S.Wang, B.Haberl, Y.S.Williams, and I.E.Bradby.J.Appl.Phys.Letters, 106, 252.103 (2015)
12. V.Domnich and Y.Gogotsi. J App. Phys.Letters, V.76, N16 (2000), 2214-2218

Indentation induced structural changes in boron-doped silicon irradiated with electrons

Giorgi Darsavelidze¹, Kakhaber Shamatava^{1,2}, Avtandil Sichinava¹, Marina Kadaria¹,

Roman Abramishvili¹

1. Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology

2. Sokhumi State University

Abstract

A complex study of the microstructure, electrophysical properties, and structural phase transformations in the processes of ultramicroindentation of boron-doped monocrystalline silicon substrates with (111) crystallographic orientation in the initial and irradiated state was carried out.

It is shown, that irradiation of p-Si samples by 12 meV energy electrons with fluences $\approx 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ stipulates decrease of the specific electrical resistivity by 3 times and holes mobility by 20%. In infrared absorption spectra of the electron irradiated samples, decrease of the oxygen and carbon atoms concentration by 2,5 -3 times is detected.

By Load-displacement measurements during the indentation processes with a Vickers indenter on the (111) planes of the research sample irradiated with electrons a weak increase of the elastic modulus and the average contact pressure corresponding to the transformations of the unstable phases of silicon is revealed. The contribution of electron irradiation modified dislocation atmospheres in the characteristics of electrophysical properties and structural phase changes carried out in the indentation processes in boron-doped silicon is discussed. The reasons for the variation of the dynamic mechanical and electrophysical properties related to the modification of dislocation structure atmospheres induced by electron irradiation in monocrystalline p-Si : B samples are analyzed.

Keywords: p-type silicon, high-energy electrons, Vickers indenter, elastic modulus, contact pressure, electrical resistivity, holes mobility.