# ნახევარგამტარებში მიმდინარე დიფუზიური პროცესების მექანიზმები

**ზ. ჯიბუტი, ა. ბიბილაშვილი, ნ. დოლიძე**

ი. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
თბილისი, საქართველო
სსიპ მიკრო- და ნანოელექტრონიკის ინსტიტუტი
თბილისი, საქართველო
z.jibuti@gmail.com

**მიღებულია 2022 წლის 27 ივნისს**

**ანოტაცია**

ნაშრომში წარმოდგენილია პროფესორ ალექსი გერასიმოვისა და მისი კვლევითი ჯგუფის მიერ შემუშავებული ახლებური მიდგომა ნახევარგამტარებში მინარევების დიფუზიის პროცესების აღწერისადმი. მინარევების ფართო სპექტრისათვის არის შესწავლილი Ge, Si, $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ და $A^{IV}B^{IV}$ ნახევარგამტარულ მასალებში დიფუზიის კოეფიციენტების დამოკიდებულება პროცესის განხორციელების მთელ რიგ პირობებზე და, განსაკუთრებით, ტემპერატურაზე. ჩატარებულია ანალიზი, თუ რამდენად სრულყოფილადაა შესაძლებელი სტანდარტული ფიზიკური მოდელებით აიხსნას ნახევარგამტარებში მინარევების დიფუზიის კოეფიციენტებისათვის დამზერილი ტემპერატურული დამოკიდებულებების თავისებურებანი. თეორიულადაა ნაჩვენები, რომ ნახევარგამტარებში მინარევის დიფუზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მოცემულ ნახევარგამტარში მინარევის ენერგეტიკული დონეების დასახლების ხარისხზე დიფუზიური პროცესის მიმდინარეობის ტემპერატურაზე. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, ნახევარგამტარებში მინარევების დიფუზიის სიჩქარეს განსაზღვრავს ის ქიმიური ბმები, რომლებიც წარმოიქმნება მინარევულ და კრისტალური მატრიცის ატომებს შორის დიფუზიის ტემპერატურაზე.

პროფესორ ალექსი გერასიმოვის სამეცნიერო მოღვაწეობა თავიდანვე დაკავშირებული იყო ნახევარგამტარულ მასალებში რადიაციული დეფექტების ფიზიკური თვისებებისა და ბუნების შესწავლასთან. ეს თემატიკა თავისთავად მოიცავს ნახევარგამტარებში დეფექტების (მათ შორის ქიმიურის) წარმოქმნის, დიფუზიისა და ტრანსფორმაციის პროცესებს [1]. აქედან გამომდინარე, მეცნიერს ბუნებრივად გაუჩნდა ინტერესი მთელი სიღრმით გარკვეულიყო ნახევარგამტარულ მასალებში მინარევების დიფუზიურ პროცესებში და მექანიზმებში.

წინამდებარე ნაშრომი ეხება პროფ. ა. გერასიმოვისა და მისი სამეცნიერო ჯგუფის მიერ შემუშავებულ კონცეფციას იმის თაობაზე, თუ დიფუზანტი მინარევული ატომების რა ფიზიკური თვისებები განსაზღვრავს ნახევარგამტარულ მასალებში მათი გადაადგილების სიჩქარეს [2 – 5].

დიფუზიის პროცესი, როგორც ნახევარგამტარული მასალების ლეგირების ხერხი, მეცნიერების მხრივ აქტიურად შესწავლის საგნად იქცა, განსაკუთრებულად მას შემდეგ,

რაც გასული საუკუნის 50-იან წლებში ნახევარგამტარების ბაზაზე შეიქმნა პირველი მიკროელექტრონული ხელსაწყოები. დიფუზიის პროცესების აღმწერ დღევანდელ მოდელებში განხორციელებულია მცდელობა, მოინახოს კორელაცია, ერთი მხრივ, ნახევარგამტარის შემადგენელ ატომებისა და, მეორე მხრივ, დიფუზანტი ატომების ისეთ ფიზიკურ მახასიათებლებს შორის, როგორიცაა ატომური თუ იონური რადიუსი, ელექტრონის შეწყვილების უნარი, ელექტროუარყოფითობა და ა.შ., და ამ გზით აიხსნას მათი დიფუზიის სიჩქარეებს შორის შენიშნული მსგავსებები, თუ განსხვავებები.

პოულობდნენ რა კონკრეტულ ნახევარგამტარულ მასალაში დიფუზანტი ელემენტების მცირე ჯგუფში გარკვეულ კანონზომიერებას, ვერ ახერხებდნენ დიფუზიის შესაბამისი მოდელების განზოგადებას დიფუზანტების მთელ სპექტრზე. ანუ არ არსებობდა ერთიანი მოდელი, რომელიც ახსნიდა, თუ რატომაა ერთიდაიგივე მინარევული ატომის დიფუზიის კოეფიციენტები კარდინალურად განსხვავებული, მაგალითად, ისეთი მსგავსი ფიზიკური თვისებების მქონე ნახევარგამტარულ მასალებში, როგორიცაა Ge და Si, ან რატომ აქვს ერთიდაიგივე ნახევარგამტარულ მასალაში მკვეთრად განსხვავებული დიფუზიის კოეფიციენტები მენდელეევის ქიმიურ ელემენტთა პერიოდული სისტემის ერთიდაიგივე ჯგუფის ელემენტებს [**6 – 15**].

განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითები.

კლასიკური ნახევარგამტარები Ge და Si მენდელეევის სისტემის IV ჯგუფის ელემენტებს წარმოადგენს. თუ ჩავატარებთ ანალიზს, თუ დიფუზიის როგორი კოეფიციენტები აქვს I – VIII ჯგუფის ელემენტებს, იკვეთება კანონზომიერება, რომ I და VIII ჯგუფის ელემენტებისათვის $D \sim 10^{-6} – 10^{-5}$ სმ/წმ, რაც სიდიდის 6 – 7 რიგით აღემატება III, IV და V ჯგუფის ელემენტების დიფუზიის კოეფიციენტებს. აღნიშნულ ეფექტს უკავშირებენ იმ გარემოებას, თუ რამდენად მსგავსი ან განსხვავებულია დიფუზანტი ატომის გარე ელექტრონული გარსი Ge-ისა და Si-ის ელექტრონულ გარსებთან მიმართებით.

შემოთავაზებულია დიფუზიის რიგი მექანიზმებისა, როგორიცაა: კვანძთაშორისი გადაადგილება, გადაადგილება ვაკანსიების გზით, ატომების მიერ ადგილების უშუალო და წრიული გაცვლები, ესტაფეტური დიფუზია, დისოციაციური გადაადგილება, დიფუზია განვრცობილ დეფექტებზე (დისლოკაციები, წყობის დეფექტები, მარცვლების საზღვრები და ა.შ.). ყველა ამ დიფუზიური მექანიზმისათვის მნიშვნელოვანი ფაქტორია დიფუზანტი ატომების ნახევარგამტარის კვანძთაშორის ან კვანძებში ყოფნის ალბათობები.

ზემოთ მოყვანილი დიფუზიის კოეფიციენტების განსხვავების ასახსნელად გამოდიან იმ მოსაზრებიდან, რომ მინარევის ატომი დიფუზიის პროცესში შეიძლება გადაადგილდეს როგორც მესერის კვანძების გზით, როდესაც ადგილი იცვლება მეზობელ რეგულარულ ატომთან ან ვაკანსიასთან, ისე – კვანძთაშორის სივრცეში. კვანძში მოხვედრისას მინარევული ატომი შეეცდება დაამყაროს ქიმიური ბმა ძირითადი მასალის 4 მეზობელ ატომთან. ასეთი ბმების წარმოქმნა ხელს უწყობს მინარევული ატომის დაყოვნებას კვანძში, რაც, თავის მხრივ, ამცირებს დიფუზიის სიჩქარეს. ვაკანსიურ მექანიზმს სწორედაც უფრო მცირე დიფუზიის კოეფიციენტი ახასიათებს, ვიდრე კვანძთაშორის მექანიზმს.

Ge-სა და Si-ს გარე შრეებზე 4 – 4 ელექტრონი აქვს $s^2p^2$ ტიპის მდგომარეობებში, რომლებიც ქმნის $sp^3$ ჰიბრიდულ ტეტრაედრულ ორბიტალებს და ახორციელებს მტკიცე ბმებს მეზობელ 4 ატომთან. იგულისხმება, რომ, რადგანაც III და V ჯგუფის ელემენტებს აგრეთვე s და p ელექტრონები აქვს, მათაც უნდა ჰქონდეს კოვალენტური ორბიტები და

 https://doi.org/10.52340/ns.2022.04

ისინიც უნდა ქმნიდეს ბმებს კვანძებში, რაც, თავის მხრივ, განაპირობებს დიფუზიის კოეფიციენტების სიმცირეს.

I და VIII ჯგუფის მინარევებს აქვს s, მაგრამ არა – p სავალენტო ელექტრონები, რომლებიც საჭიროა ჰიბრიდული ბმების წარმოსაქმნელად. შესაბამისად, კვანძებში მათი ყოფნა არასტაბილურია და დიფუზიის პროცესი ძირითადად კვანძთაშორისი მექანიზმით ხორციელდება, რაც განაპირობებს დიფუზიის კოეფიციენტების შედარებით მაღალ მნიშვნელობებს.

ზემოთ მოყვანილი დიფუზიის კოეფიციენტების სიდიდეებში განსხვავების ახსნა ლოგიკურია, მაგრამ პროფ. ა. გერასიმოვისა და მისი სამეცნიერო ჯგუფის მიერ ჩატარებულმა ანალიზმა გამოავლინა რიგი სხვა ექსპერიმენტული ფაქტებისა, რომლებიც ვერ ჯდებოდა აღნიშნულ მოდელებში და მოითხოვდა მათი მიზეზების დადგენას [**2 – 5**]:

1. Zn-სა და Cd-ს, რომლებიც ელემენტთა პერიოდული სისტემის II ჯგუფს მიეკუთვნება, და, მსგავსად VIII ჯგუფის ელემენტებსა, მხოლოდ 2s ელექტრონი აქვს სავალენტო შრეზე, Si-ში დიფუზიის პრაქტიკულად იგივე კოეფიციენტი აქვს, როგორც I და VIII ჯგუფის ელემენტებს, მაგრამ Ge-ში – ისეთივე დაბალი, როგორც III და V ჯგუფის ელემენტებს.
2. Fe-სა და Au-ს Si-ში აქვს გაცილებით უფრო მაღალი დიფუზიის კოეფიციენტი, ვიდრე Ge-ში.
3. Cu-სა და Au-ს Ge-ში აქვს გაცილებით უფრო მაღალი დიფუზიის კოეფიციენტი, ვიდრე Si-ში.

აღნიშნული და დიფუზიის პროცესის სიჩქარეებისთვის დამახასიათებელი რიგი სხვა თავისებურებების ასახსნელად ა. გერასიმოვმა კოლეგებთან ერთად ყურადღება მიაქცია იმ ფაქტს, რომ დიფუზიის პროცესში ესა თუ ის მინარევი სხვადასხვა ნახევარგამტარში სხვადასხვა მუხტურ მდგომარეობაში იმყოფება და, შესაბამისად, გარე შრეზე აქვს ელექტრონთა განსხვავებული რაოდენობა (მბმელი ელექტრონები). მართლაც, მაგალითად:

1. Zn და Cd Ge-ში ქმნის 2 – 2 აქცეპტორულ დონეს $E_v$ + 0.03 და 0.09 ევ და $E_v$ + 0.05 და 0.15 ევ, შესაბამისად [**16**]. დიფუზიის ტემპერატურაზე ორივე დონე იონიზებულია და ეს ელემენტები დიფუნდირებენ, როგორც $Zn^{--}$ და $Cd^{--}$ იონები გარე შრის $s^2p^2$ კონფიგურაციით. მაშასადამე, იქმნება $sp^3$ ჰიბრიდული კავშირები Ge-ის მეზობელ რეგულარულ ატომებთან. სწორედ ამითაა განპირობებული მათი Ge-ში დიფუზიის კოეფიციენტების დაბალი მნიშვნელობები.
2. იგივე მინარევები, Zn და Cd, Si-ში იძლევა დონეებს $E_v$ + 0.31 და 0.67 ევ და $E_v$ + 0.55 და 0.67 ევ, შესაბამისად [**17**]. დიფუზიის პირობებში Zn-ს აქვს 3 ელექტრონი გარე შრეზე, ხოლო Cd-ს – 2. ეს განსხვავება განაპირობებს მათ უფრო სწრაფ დიფუზიას Si-ში, ვიდრე Ge-ში. ანალოგიურ ანალიზს Si-ში Fe-ის დიფუზიის პროცესის მიმართ მივყავართ იმ დასკვნამდე, რომ აქ გარე შრეზე მხოლოდ 1 ელექტრონის არსებობა განაპირობებს უფრო მაღალ დიფუზიის კოეფიციენტს, ვიდრე Ge-ში.

მკვლევართა ჯგუფმა მიაქცია აგრეთვე ყურადღება იმ ფაქტს, რომ როდესაც ხდება შედარება იმ მინარევების დიფუზიის კოეფიციენტებისა, რომლებსაც გარე შრეზე ელექტრონების ერთნაირი რაოდენობა აქვს, მნიშვნელოვანი ხდება მათი დიფუზიის კვანძთაშორისი მექანიზმი, სადაც არსებით როლს ასრულებს არა მათი ტეტრაედრული, არამედ – ატომური ან იონური რადიუსები.

აღნიშნული დასტურდება, მაგალითად, Ge-ში I ჯგუფის ელემენტების – Li, Cu, Ag და Au – რადიუსების ზრდით დიფუზიის კოეფიციენტების მნიშვნელობათა შემცირებასთან კორელაციით.

ყოველივე ზემოთ თქმულმა მკვლევართა ჯგუფს მისცა საშუალება ჩამოეყალიბებინა კონცეფცია, რომლის მიხედვითაც, ნახევარგამტარებში მინარევების დიფუზიის კოეფიციენტის სიდიდე დამოკიდებულია მოცემულ ნახევარგამტარში მინარევების ელექტრონული ენერგეტიკული დონეების დასახლების ხარისხზე იმ ტემპერეტურის პირობებში, რომელზედაც ტარდება დიფუზია. სხვაგვარად შეიძლება ითქვას, რომ ნახევარგამტარებში მინარევების დიფუზიის სიჩქარეს განსაზღვრავს ის რეალური ქიმიური კავშირები, რომლებსაც ახორციელებს მინარევული ატომები კრისტალური მატრიცის ატომებთან დიფუზიის ჩატარების ტემპერატურებზე.

როგორც ზემოთ ითქვა, დიფუზიის შემოთავაზებული მოდელი შემუშავებული იყო Ge-სა და Si-ში მინარევების დიფუზიის პროცესების ანალიზის საფუძველზე. იმისთვის, რომ დიფუზიის მოდელი არ ატარებდეს კერძო ხასიათს, იგი სამართლიანი უნდა იყოს ყველა ცნობილი ნახევარგამტარული მასალისათვის. შემდგომში ზ. ჯიბუტის მიერ დიფუზიის აღნიშნული მექანიზმის სამართლიანობა შემოწმებულ იქნა $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ და $A^{IV}B^{IV}$ ტიპის ნახევარგამტარებისათვის და გაკეთდა დასკვნა, რომ დიფუზიის ზემოთმოყვანილი მოდელი უნივერსალურ ხასიათს ატარებს [**18 – 20**].

დიფუზიის აღნიშნული მოდელის დამადასტურებელ ფაქტებად შეიძლება ჩაითვალოს ისიც, რომ წარმოდგენილი მოდელის ფარგლებში შესაძლებელი გახდა ახსნილიყო რიგი ფიზიკური პროცესებისა ნახევარგამტარებში, როგორიცაა მაგალითად:

1. დონორული მინარევებით ძლიერ ლეგირებულ Si-ში ადგილი აქვს ოქროს ხსნადობის მკვეთრ ზრდას. ჩვეულებრივი დიფუზიის პირობებში Au-ს, როგორც I ჯგუფის ელემენტს, გარე შრეზე ერთი ელექტრონი აქვს და მეზობელ ატომებთან ახორციელებს კავშირებს მხოლოდ ამ ერთი ელექტრონით, რაც უზრუნველყოფს Au-ის დიფუზიის მაღალ კოეფიციენტს Si-ში. ძლიერ ლეგირებულ Si-ში ფერმის დონე გადის აკრძალულ ზონაში ისე, რომ Au-ის აქცეპტორული დონე $E_C - 0.54$ ევ იონიზებულია და ბმებს კვანძში უკვე 2 ელექტრონით ახორციელებს. ეს იწვევს Au-ის აქტივაციის ენერგიის ორჯერ გაზრდას და, შესაბამისად, დიფუზიის კოეფიციენტის შემცირებას, რაც დაიმზირება ექსპერიმენტზე [**4**].
2. დეფექტების წარმოქმნისათვის საჭირო ზღვრულზე ნაკლები ენერგიის რადიაციის მცირე დოზის მოქმედებისას ადგილი აქვს ე.წ. რადიაციულად სტიმულირებულ დიფუზიას. რადიაციით სტიმულირებული დიფუზიის შემოთავაზებული მექანიზმი იმაში მდგომარეობს, რომ დიფუზიის აქტივაციის ენერგია დამოკიდებულია იმ კონკრეტულ პირობებზე, რომლებიც განსაზღვრავს დიფუზანტის ბმას მატრიცასთან დიფუზიის პირობებში. რადიაციის მოქმედება იწვევს დამაკავშირებელი ქიმიური ბმების გაწყვეტას და ამავდროულად, პროცესის მიმდინარეობის ტემპერატურის (აკრძალულ ზონაში ფერმის დონის მდებარეობის) გათვალისწინებით, გასაგები ხდება დიფუზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობებს შორის განსხვავება [**3**].
3. Ge-სა და Si-ზე რადიაციის მოქმედების პროცესში მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები იუწყება, რომ ამ ნივთიერებების შემადგენელი ატომების თვითდიფუზიის კოეფიციენტები სიდიდის 2 – 3 რიგით აღემატება თერმოდიფუზიით მიღებულ შედეგებს. ეს ფაქტი ძნელად ასახსნელი იყო ზემოთ მოყვანილი დიფუზიის მოდელის ფარგლებში. თუმცა, ნაჩვენები იქნა, რომ

 https://doi.org/10.52340/ns.2022.04

აღნიშნული ეფექტი დიფუზიის ესტაფეტური მექანიზმით აიხსნება, რომლის დროსაც ადგილი აქვს ჰანტელური კვანძთაშორისი კონფიგურაციის გადაადგილებას. ე.ი. დიფუზიური პროცესის ეფექტურობის განმსაზღვრელი ფაქტორია დიფუზანტისა და ძირითადი მესრის ატომებს შორის წარმოქმნილი ქიმიური ბმების სიძლიერე. დიფუზიის აღნიშნული მექანიზმი აღწერს ისეთი კვანძთაშორისი ატომების დიფუზიას, რომლებიც არაფრით არ განსხვავდება მესრის რეგულარული ატომებისაგან და რეალურად არის არა გარკვეულად ნიშანდებული ატომების დიფუზია (დიფუზიის კლასიკური შემთხვევა, სადაც ადგილი აქვს მასის გადატანას), არამედ – ატომების მიერ დაკავებული კვანძთაშორისი მდგომარეობების გადანაცვლებას წარმოადგენს. ეს მოსაზრება დასტურდება ექსპერიმენტული მონაცემებით [**5**].

შემდგომში, პროფ. ა. გერასიმოვისა და მისი კოლეგების მრავალწლიანი სამეცნიერო მუშაობის პერიოდში განხორციელებულმა ექსპერიმენტულმა კვლევებმა, რომლებიც პოულობდა თანაკვეთას დიფუზიურ-აქტივაციურ პროცესებთან, ნათლად აჩვენა ნახევარგამტარებში დიფუზიური პროცესების მიმდინარეობის მათებური ხედვის სამართლიანობა [**18 – 27**].

**დამოწმებანი**


[1] Ред. Л. С. Смирнов. Физические процессы в облученных полупроводниках, 1977, Новосибирск, Наука.

[2] А. Б. Герасимов, Б. А. Герасимов, А. А. Церцвадзе. Вляние зарядового состояния примеси на их диффузию в полупроводниках. Сообщ. АН Грузинской ССР, 1975, 77, 1, 53-56.

[3] А. Б. Герасимов, М. Ш. Джандиери, А. А. Церцвадзе. Модель радиационно-стимулированной диффузии при диссоциативном механизме. Физ. тех. полупров., 1978, 12, 6, 1000-1003.

[4] А. Б. Герасимов, М. Ш. Джандиери, А. А. Церцвадзе. К вопросу о диффузии золота в сильно легированном кремнии. Физ. тех. полупров., 1978, 12, 6, 1193-1194.

[5] А. Б. Герасимов, А. А. Церцвадзе. О механизме самодиффузии в Ge и Si. Физ. тех. полупров., 1979, 13, 2, 350-352.

[6] Б. И. Болтакс. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках, 1972, Ленинград, Наука.

[7] Ed. D. Shaw. Atomic Diffusion in Semiconductors, 1973, London–New York, Plenum Press.

[8] B. Tuck. Introduction to Diffusion in Semiconductors, 1974, Stevenage, Peregrinus.

[9] Х. Мерер. Диффузия в твердых телах, 2011, Москва, Интелект.

[10] B. Tuck. Diffusion in semiconductors. Microelectronics J., 1982, 13, 5, 29-34.

[11] W. Frank, U. Gösele, H. Mehrer, A. Seeger. Diffusion in silicon and germanium. In: Diffusion in Crystalline Solids (Ed. G. E. Murch, A. S. Nowick), 1984, Orlando, Academic Press, Ch.2, 29-34 .

[12] Н. Н. Рунов. Строение атомов и молекул, 1994, Москва, Просвещение.

[13] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, 1, 1984, Москва, Мир.

[14] A. F. W. Willoughby. Atomic diffusion in semiconductors. Rep. Prog. Phys., 1978, 41, 10, 1665-1705.

[15] Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников, 1989, Москва, Наука.

[16] Б. А. Аронзон, С. Д. Лазарев, Е. З. Мейлихов. Физические свойства полупроводниковых материалов, 1973, Москва, Инст. ат. энер. им. И. В. Курчатова.

[17] Отв. ред. Б. И. Болтакс. Компенсированный кремний, 1972, Ленинград, Наука.

[18] З. В. Джибути, Г. А. Тахмазиди. Влияние химической связи на диффузию примесей в полупроводниках типа $A^{III}B^{V}$. В сб.: Тез. докл. IV Респ. конф. мол. уч. и спец. по вопр. МЭ и физ. п/п приб., 1980, Тбилиси, Мион, 155-156.

[19] З. В. Джибути. Исследования свойств радиационных дефектов в GaAs и механизма их лазерного отжига (Дисс. на соис. уч. ст. канд. физ.-мат. наук), 1989, Тбилиси, Тбилисский гос. унив.

[20] З. В. Джибути. Механизм импульсного фотонного отжига в полупроводниках с ковалентными и смешанными связями (Дисс. на соис. уч. ст. докт. физ.-мат. наук), 2006, Тбилиси, Тбилисский гос. унив.

[21] I. G. Gverdtsiteli, A. B. Gerasimov, Z. G. Gogua, Z. V. Jibyti, M. G. Pkhakadze. Physical principles of athermic processes in the microelectronic technology. In: Celostatna konferencia mikroelectronika sorahranicnou ucastou, 1989, Bratislava, 36-37.

[22] И. Г. Гвердцители, А. В. Герасимов, З. Г. Гогуа, З. В. Джибути, Д. А. Кимеридзе, М. Г. Пхакадзе, В. Н. Сванидзе. Нетепловой механизм фазового перехода I рода, дефектообразования и диффузии в ковалентных кристаллах. В сб.: Тр. конф. физ. посвящ. 80-летию со дня рожд. акад. АН Грузинской ССР проф. М. М. Мирианашвили, 1989, Тбилиси, Изд. Тбилисского унив., 122-128.

[23] И. Г. Гвердцители, А. Б. Герасимов, З. Г. Гогуа, З. В. Джибути, М. Г. Пхакадзе. Электронно-дырочный механизм образования точечных дефектов в ковалентных кристаллах. Сообщ. АН Грузинской ССР, 1987, 127, 3, 517-520.

[24] И. Г. Гвердцители, А. Б. Герасимов, З. Г. Гогуа, З. В. Джибути, М. Г. Пхакадзе. О механизме диффузии в ковалентных кристаллах. Сообщ. АН Грузинской ССР, 1987, 128, 2, 293-296.

[25] А. Б. Герасимов, З. Г. Гогуа, З. В. Джибути, Д. А. Кимеридзе, М. Г. Пхакадзе, В. Н. Сванидзе. Новый механизм диффузии в конденсированных системах. В сб.: Тез. докл. 1-го Всесоюз. пост. сем. по низкотемпер. легир. п/п и многосл. струк. МЭ, 1987, Устинов, 22-22.

[26] Н. М. Алания, А. Б. Герасимов, З. Г. Гогуа, З. В. Джибути, Г. Л. Офенгейм, Г. А. Тахмазиди, Т. С. Чолокашвили. Энергия связи и глубина залегания уровней в германии и крумнии. В сб.: Тез. докл. 4-ой Респ. конф. мол. уч. и спец. по вопр. МЭ и физ. п/п приб., 1980, Тбилиси, Мион, 5-6.

[27] А. Б. Герасимов, З. В. Джибути, Г. А. Тахмазиди. Влияние химической связи на коэффициент диффузии в металлах. В сб.: Тез. докл. 4-ой Респ. конф. мол. уч. и спец. по вопр. МЭ и физ. п/п приб., 1980, Тбилиси, Мион, 15-16.

 https://doi.org/10.52340/ns.2022.04