

# **გასწავრივი მიმართულებით უცვლელი ელექტროგამტარების მქონე $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარების მოცულობითი კრისტალების მიღება**

**თენგიზ ქაშუაძე**  
ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და  
მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტი

**ელზა ხუციშვილი**  
ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და  
მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტი

**ნანა ეობულაშვილი**  
ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და  
მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტი

**ზურაბ ჩუბინიშვილი**  
ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და  
მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტი

## **აბსტრაქტი**

მიმოხილულია  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარების თვისებები და მათი გამოყენების სფეროები. ეს ნახევარგამტარული მასალა მეტად პერსპექტიულია თავისი უნიკალური თვისების, რადიაციული ზემოქმედების მიმართ მედეგობის გამო. ამიტომ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარების ერთგვაროვანი მოცულობითი კრისტალების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება და დახვეწა დღეისათვის მეტად აქტუალურია. მათ მისაღებად არჩეულია ჩოხრაღსკის მეთოდი. აღწერილია გამოყენებული ტექნოლოგიური დანადგარი და მოყვანილია ამ დროს მიღებული ნიმუშების ელექტროფიზიკური პარამეტრები. ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარების ელექტროგამტარებლობა მათი სხმულების ბოლოსკენ იზრდება, რაც გამოწვეულია ნადნობში მინარევთა კონცენტრაციის მატებით. ზრდის მიმართულების გასწვრივ ელექტროგამტარებლობის მხრივ ერთგვაროვანი სხმულის მისაღებად წარმატებით იქნა გამოყენებული კრისტალის ამონევის სიჩქარის თანდათანობითი მომატების მეთოდი. მოყვანილია გაზრდილ ნიმუშებში სიგრძის გასწვრივ ხვედრითი წინაღობების განაწილების გრაფიკები.

**საკვანძო სიტყვები:** ნახევარგამტარი, დასხივება, მყარი ხსნარები, ელექტროგამტარობა, კრისტალები.

# Producing of bulk crystals of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ solid solutions with unchanged electroconductivity in the longitudinal direction

**Tengiz Qamushadze**  
Ferdinand Tavadze Institute of  
Metallurgy and Materials Science

**Elza Khutsishvili**  
Ferdinand Tavadze Institute of  
Metallurgy and Materials Science

**Nana Kobulashvili**  
Ferdinand Tavadze Institute of  
Metallurgy and Materials Science

**Zurab Chubinishvili**  
Ferdinand Tavadze Institute of  
Metallurgy and Materials Science

## Abstract

The properties of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  solid solutions and their areas of application are considered.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  solid solutions, due to their unique properties and tolerance to radiation, are promising materials for radiation-resistant electronics. Therefore, the development of a technology for obtaining homogeneous bulk crystals of solid solutions and refinement are very relevant today. Czochralski method is chosen to obtain them. The technological equipment used is described and the electrophysical parameters of the samples obtained at this time are given. It has been experimentally found that the electrical conductivity of solid solutions of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  increases towards the end of crystal slit, which is caused by an increase in the concentration of impurities in the melt. The method of gradually increasing the crystal pulling velocity was successfully used to obtain a uniform distribution of electrical conductivity in slit along the growth direction. Graphs of distribution of specific resistivity along the length are presented.

**Key words:** Semiconductor, radiation, solid solutions, electroconductivity crystals.

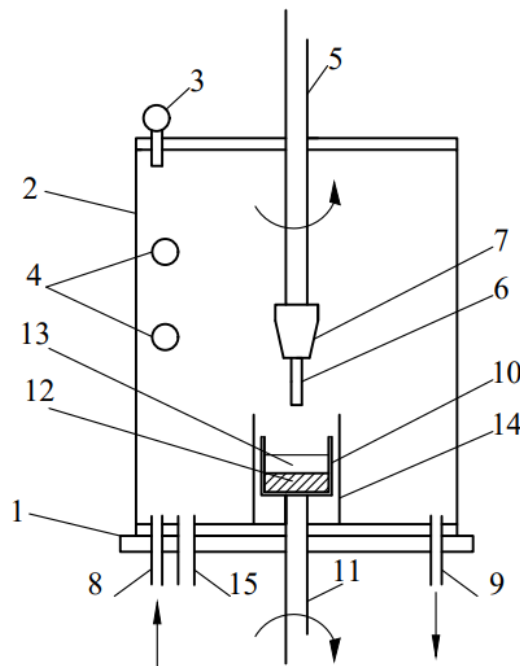
## შესავალი

თანამედროვე ტექნოლოგიების განვითარება მჭიდროდაა დაკავშირებული ისეთი ნახევარგამტარული მასალების შექმნასთან, რომლებიც პასუხობენ განვითარების მოცემულ ეტაპზე მეცნიერებისა და ტექნიკის წინაშე მდგარ გამოწვევებს. ასეთ ნახევარგამტარულ მასალას წარმოადგენენ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარები, რომლებიც მათი პირდაპირი ენერგეტიკული ზონების, აკრძალული ზონის ხელსაყრელი სიგანის, დენის მატარებელთა მაღალი ძვრადობის და მრავალი სხვა თვისებების გამო წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნან მზის ენერჯის გარდამქმნელებში, ინფრარითელი და ხილული ტალღების მიმღებებსა და გამომსხივებლებში, ლაზერებში, მაღალი სიხშირის ტრანზისტორებში და ა.შ. ამას გარდა,  $\text{InAs}$ -III-V- ტიპის მყარ ხსნარებში აღმოჩენილმა რადიაციული დონორებისა და აქცეპტორების ურთიერთკომპენსაციის მოვლენამ [1-7] დასახა მნიშვნელოვანი პერსპექტივები ახალი ტიპის რადიაციულად მდგრადი ნახევარგამტარული მასალების შექმნისა და გამოყენების თვალსაზრისით. აღნიშნულიდან გამომდინარე,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარების ერთგვაროვანი მოცულობითი კრისტალების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება და დახვეწა დღეისათვის მეტად აქტუალურია და სწორედ ამ საკითხების გადაწყვეტას ეძღვნება წინამდებარე ნაშრომი.

## მეთოდოლოგია და მიღებული შედეგები.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მყარი ხსნარების მოცულობითი კრისტალების მისაღებად გამოვიყენეთ ჩოხრალსკის მეთოდი. ამ მიზნისათვის გამოყენებული იქნა ტექნოლოგიური დანადგარი, რომლის უმნიშვნელოვანეს შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს

მაღალტემპერატურული კამერა. მისი სქემა მოყვანილია სურ. 1-ზე.



სურ. 1 ჩოხრალსკის დანადგარის მაღალტემპერატურული კამერის სქემა

უჟანგავი ფოლადისგან დამზადებული კამერა შედგება ფუძისა (1) და ხუფისაგან (2), რომლებიც ფუძეში დატანებული ვაკუუმური საფენის მეოხებით მჭიდროდ ეკვრიან ერთმანეთს, რაც სისტემაში როგორც ვაკუუმის, ასევე ინერტული აირის წნევის შენარჩუნების საშუალებას იძლევა. ხუფის ზედა ნაწილში მიმაგრებულია მანომეტრი (3) კამერაში ინერტული აირის წნევის გასაზომად, ხოლო შუაში, ერთმანეთის თავზე, განთავსებულია ორი ოპტიკური ფანჯარა (4), კამერაში მიმდინარე პროცესების საკონტროლოდ. კამერას ზემოთ დატანებული აქვს ხვრელი, რომელშიც, ვაკუუმური საფენების გავლით, ვერტიკალური მიმართულებით ჩადის ღერძი (5). ამ ღერძს ეხრახნება მადედებლის (6) დამჭერი (7). ვაკუუმური საფენების წყალობით ვაკუუმის დაურღვევლად ღერძს შეუძლია არა მარტო ვერტიკალურად გადაადგილება ზევით-ქვევით, არამედ ბრუნვაც საკუთარი ღერძის გარშემო. კამერის ფუძეს გააჩნია ინერტული აირის შემშვები (8) და გამშვები (9) ხვრელები. ფუძეს

ცენტრში გააჩნია ხვრელი, რომელშიც, ვაკუუმური საფენების გავლით, შეყვანილია გრაფიტის ტიგელის (10) მბრუნებელი ღერძი (11). ცილინდრული ფორმის გრაფიტის ტიგელში თავსდება ასეთივე ფორმის კვარცის ტიგელი. ამ უკანასკნელში იტვირთება კაზმი (12) და ფლუსი (13). კამერის ფუძეზე ელექტროიზოლირებულად, განთავსებულია გრაფიტის ღუმელი (14). უნდა აღინიშნოს, რომ, ისევე როგორც ზედა ღერძს, ტიგელის მბრუნებელ ღერძსაც, კამერაში ვაკუუმის დაურღვევლად, შეუძლია გადაადგილება ვერტიკალური მიმართულებით და აგრეთვე ბრუნვა თავისი ღერძის გარშემო. კამერაში ვაკუუმის დასამყარებლად მას ფუძეზე დატანებული აქვს მილი (15), რომელიც მიერთებულია ვაკუუმის სისტემასთან.

ტექნოლოგიური პროცესების ჩატარებისას განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა აქვს კაზმისათვის საბაზო ნივთიერებების შერჩევას და მათ წინასწარ დამუშავებას. საბაზო ნივთიერებებზე ავირჩიეთ სინთეზირებული არალეგირებული n-ტიპის GaAs და InAs ( $n=1015\text{ სმ}^{-3}$  -  $1016\text{ სმ}^{-3}$ ). ჩვენი მიზანი იყო  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მიღება, ამიტომ კაზმში მათი წონითი პროცენტების დასადგენად ვსარგებლობდით ფორმულით  $m_{\text{GaAs}} : m_{\text{InAs}} = M \cdot x / M_{\text{InAs}} (1-x)$ , სადაც  $m_{\text{GaAs}}$  და  $m_{\text{InAs}}$  GaAs -ის და InAs -ის მასებია კაზმში, ხოლო  $M_{\text{GaAs}} = 144,64$  გ.მოლი-1 და  $M_{\text{InAs}} = 189,74$  გ.მოლი-1 მათი მოლური წონებია შესაბამისად. მიღებული კრისტალის გამტარებლობის ტიპი განპირობებულია გაზრდისას

ნიმუშებში შესული არაკონტროლირებადი და მასში სპეციალურად შეყვანილი მალეგირებული მინარევების კონცენტრაციებით.

დამდნარ კაზმში მალეგირებული მინარევების საჭირო რაოდენობის გამოთვლას ვაწარმოებდით ცნობილი ფორმულის გამოყენებით:  $m\% = Mn100 / N_A d$ , სადაც M მალეგირებული ნივთიერების მოლური მასაა, n- გამდნარ კაზმში ამ მინარევის კონცენტრაცია ( $\text{სმ}^{-3}$ ),  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ -ავოგადროს რიცხვი (მოლი-1), d-InGaAs-ის სიმკვრივე და m% კი მალეგირებული ნივთიერების პროცენტული მასაა. ამ ფორმულით გამოთვლილი n არის მინარევის კონცენტრაცია კაზმის გამდნარ ფაზაში, რაც განსხვავდება მყარ ფაზაში, ანუ გაზრდილ კრისტალში გადასული მინარევის ( $n_s$ ) კონცენტრაციისგან. ამ კონცენტრაციის დასადგენად საჭიროა მინარევის სეგრეგაციის კოეფიციენტის ცოდნა მაგრამ ლიტერატურაში ვერ მოიძებნა ჩვენთვის საინტერესო მინარევების ცინკისა და მანგანუმის სეგრეგაციის კოეფიციენტები  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ში, რის გამოც სასურველი შედეგის მიღწევა მოხერხდა მხოლოდ ემპირიული გზით.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის ნაღობიდან მოცულობითი კრისტალის ამოსაქაჩად ვიყენებდით [100] კრისტალოგრაფული მიმართულების გალიუმის არსენიდის მადედებელს.

ტექნოლოგიური პროცესის დაწყებამდე კაზმის შემადგენელი კომპონენტები განიცდიდნენ ქიმიურ დამუშავებას. უნდა აღინიშნოს, რომ ჩვენი კაზმი შეიცავს ადვილადაქროლად კომპონენტს-დარიზხანს, რომელიც ღუმელის გახურებისას კაზმის გადნობამდე გაცილებით ადრე იწყებს ინტენსიურ აორთქლებას. ამის თავიდან ასაცილებლად ვიყენებთ ფლუსს, გამჭვირვალე დამცავ ფენას. ფლუსად გამოვიყენეთ ბორის ანჰიდრიდი-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. ეს არჩევანი იმიტომ გაკეთდა, რომ ბორის ანჰიდრიდი ქიმიურად უსაიეროა როგორც GaAs-ის, ასევე InAs-ის მიმართ მაღალ ტემპერატურებზეც კი. ამავე დროს გამდნარი ბორის ანჰიდრიდი ბლანტი, გამჭვირვალე სითხეა, რის გამოც კრისტალის ზრდის დამზერა თავისუფლად შესაძლებელი მთელი ტექნოლოგიური პროცესის განმავლობაში. ბორის ანჰიდრიდი ჰაერიდან ადვილად შთანთქავს განსაკუთრებით წყლის ორთქლს და სხვა აირებსაც. ამიტომ წინასწარ დამუშავებული ფლუსიდან შეიძლება დიდი რაოდენობის არასასურველი მინარევი შევიდეს ზრდად კრისტალში. ამის გამო ფლუსი წინასწარ განიცდიდა თერმულ დამუშავებას ვაკუუმში.

გამოვთვალეთ ფლუსის მასა, რომელიც ნაღობის თავზე მოგვცემდა 10-12 მმ-ის სისქის დამცავ ფენას. იგი ჩვენი გეომეტრიის ტიგელისთვის აღმოჩნდა დაახლოებით 50 გრამის ტოლი. ასეთი შემადგენლობის კაზმი და ფლუსი იტვირთებოდა კვარცის ტიგელში და თავსდებოდა ზემოთაღწერილი ჩოხრალსკის დანადგარის კამერაში. ვაკუუმური სისტემის ჩართვით კამერიდან იტუმბებოდა ჰაერი. შემდეგ შესაბამისი

სარქველების ჩაკეტვით ხდებოდა ვაკუუმური სისტემის გამორთვა და კამერაში ხდებოდა არგონის შეშვება 0,ნატმ. წნევით. ამის შემდეგ ირთვებოდა ღუმელი და იწყებოდა ტიგელის ნელნელა გახურება 1 საათის განმავლობაში 650C-დე. ამ ხნის განმავლობაში ფლუსი დნებოდა და ფარავდა მყარ კაზმს. ტემპერატურის მომატება გრძელდება კაზმის სრულ დადნობამდე-1160 C-მდე. ამ ნიშნულზე 30 წუთით დაყოვნების შემდეგ ტემპერატურა მცირდებოდა 200-ით და 15 წუთის განმავლობაში ხდებოდა მადედებლის მიახლოება ნაღობთან. მათი კონაქტის შემდეგ ხდებოდა ტემპერატურის 5 გრადუსით მომატება, მიმდინარეობდა მადედებლის ე.წ. თერმული „მონამვლა“-მას ადნებოდა დაახლოებით 2 მმ. ამის შემდეგ ტემპერატურა ისევ მცირდებოდა 5 გრადუსით, ხდებოდა მადედებლის კონტაქტი ნაღობთან და 2-3 წუთით და ირთვებოდა მადედებლის ღერძის ვერტიკალურად ზევით გადაადგილება სიჩქარით 0,25მმ.წთ-1. ამასთან ტემპერატურა ისე რეგულირდებოდა, რომ დასაწყისში გაზრდილ კრისტალს ჰქონოდა 300-იანი კონუსის ფორმა, ხოლო

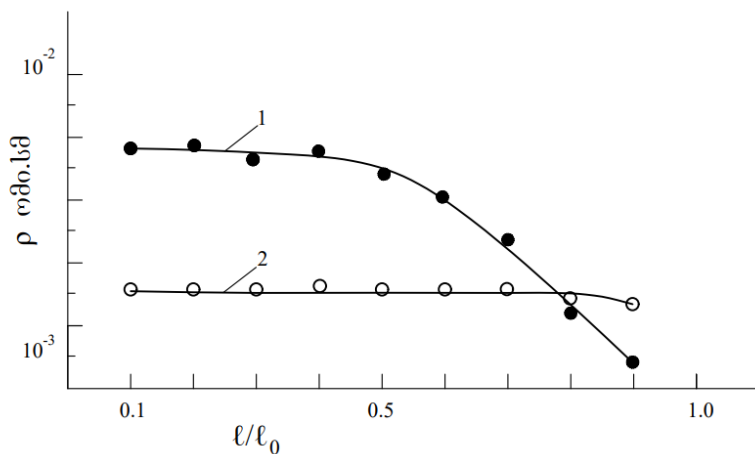
შემდეგ გაზრდილიყო უცვლელი დიამეტრით. პროცესის ბოლოს გაზრდილი კრისტალი შორდებოდა ნაღობს ამ უკანასკნელის ტემპერატურის მომატებით და კრისტალი ფლუსიდან იგივე სიჩქარით ამოდიოდა. ფლუსს მოცილებული კრისტალის სხმული ოთახის ტემპერატურამდე ცივდებოდა 1,5 საათის განმავლობაში.

უნდა აღინიშნოს, რომ ასე გაზრდილი მოცულობითი სხმულები მსხვილმარცვლოვანი პოლიკრისტალები აღმოჩნდნენ სპეციალური ლევირების გარეშე ისინი n-ტიპის გამტარებლობისანი იყვნენ, ელექტრონთა კონცენტრაციით (3-7).1017 სმ-3. p-ტიპის გამტარებლობის მისაღებად ჩვენ კაზმებში შეგვყავდა ცინკი ან მანგანუმი, რომელთა პროცენტულ წონას ვითვლიდით ზემოთმოყვანილი ფორმულით. ასეთ ნიმუშებში ხვრელების კონცენტრაცია იყო (2-8).1018 სმ-3. ასე გაზრდილი ნიმუშების ელექტროფიზიკური პარამეტრები მოყვანილია ცხრილ 1-ში.

ცხრილი 1. InGaAs-ის მოცულობითი კრისტალების ელექტროფიზიკური პარამეტრები

მინარევი	გამტარებლობის ტიპი	ჰოლის კოეფიციენტი, სმ <sup>3</sup> .კულ <sup>-1</sup>	n, p, სმ <sup>-3</sup>	ძვრადობა, სმ <sup>2</sup> /ვ.წმ	კუთრი წინაღობა, ომი.სმ
-	n	20	3,1 · 10 <sup>17</sup>	2300	8,7 · 10 <sup>-3</sup>
-	n	8,9	6,9 · 10 <sup>17</sup>	1500	6,0 · 10 <sup>-3</sup>
-	n	12,5	5,1 · 10 <sup>17</sup>	1800	6,9 · 10 <sup>-3</sup>
Zn	p	1,6	4,0 · 10 <sup>18</sup>	350	4,6 · 10 <sup>-3</sup>
Mn	p	2,8	2,2 · 10 <sup>18</sup>	360	7,8 · 10 <sup>-3</sup>
Mn	p	1,9	3,2 · 10 <sup>18</sup>	310	6,1 · 10 <sup>-3</sup>
Mn	p	1,0	6,1 · 10 <sup>18</sup>	270	3,8 · 10 <sup>-3</sup>
Mn	p	0,8	3,4 · 10 <sup>18</sup>	250	3,2 · 10 <sup>-3</sup>

როგორც აღვნიშნეთ, ხვრელები გამტარებლობის ნიმუშების მისაღებად In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-ის კრისტალებს გაზრდის პროცესში ვალევირებით ცინკით ან მანგანუმით. აღმოჩნდა, რომ მიღებული მოცულობითი კრისტალების ელექტროგამტარებლობა სხმულის ბოლოსკენ იზრდებოდა. ეს იმით აიხსნება, რომ ამ ორივე მალევირებელი მინარევის სეგრეგაციის კოეფიციენტი ერთზე ნაკლებია, რის გამოც კრისტალის ბოლოსკენ იზრდება მათი და, მაშასადამე, ხვრელების კონცენტრაციაც. ამასთან ცხადია, რომ მინარევის კონცენტრაციის ზრდა იწვევს დენის მატარებელთა ძვრადობის შემცირებას. როგორც ჩანს, მინარევთა კონცენტრაციის ზრდისას ხვრელების კონცენტრაცია უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე მცირდება მათი ძვრადობა. სხმულების გასწვრივ ამ არაერთგვაროვნების აღმოსაფხვრელად ჩვენ გამოვიყენეთ კრისტალის გაზრდის სიჩქარის ცვლილების ხერხი. ამონევის სიჩქარის გაზრდა ამცირებს მინარევის სეგრეგაციის კოეფიციენტის სიდიდეს. ამიტომ ამ სიჩქარის ცვლილების ტემპის სათანადო შერჩევით შეიძლება დავაკომპენსიროთ კრისტალის გაზრდის პროცესში ნაღობში დარჩენილი მინარევის კონცენტრაციების ზრდის პრობლემა. ნახ.2-ზე გამოსახულია მუდმივი (1) და ცვლადი (2) სიჩქარით გაზრდილ მანგანუმით ლევირებულ In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-ის კრისტალებში ზრდის მიმართულების გასწვრივ ხვედრითი წინაღობების განაწილების პროფილი.





ნახ. 2.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის მოცულობით კრისტალებში ზრდის მიმართულების გასწვრივ ხვედრითი წინაღობის განაწილების პროფილი (10- გამზრდილი კრისტალის სრული სიგრძე, 1- დასაწყისიდან გამოძილ ნიმუშამდე მანძილი).  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის კრისტალები გაზრდილი: 1-მუდმივი სიჩქარით; 2-ცვლადი სიჩქარით.

## დასკვნა

ჩატარებული ექსპერიმენტებით დადგინდა, რომ ჩოხრაღსკის მეთოდით შეიძლება მიღებულ იქნას  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -ის სხვადასხვა შემადგენლობის მყარი ხსნარების მოცულობითი კრისტალები. ამასთან, უცვლელი სიჩქარით გაზრდილ კრისტალებში ზრდის მიმართულების გასწვრივ დაიმზირება ელექტროგამტარებლობის მატების ტენდენცია. კრისტალების ზრდის სიჩქარის თანდათანობითი მატებით შესაძლებელია მივიღოთ მთელი სიგრძის გასწვრივ ერთნაირი სიდიდის ხვედრითი წინაღობის მქონე ნიმუშები, რაც აიხსნება ამ დროს მინარევთა სეგრეგაციის კოეფიციენტის კლებით.

## გამოყენებული ლიტერატურა

- N. Kekelidze, G. Kekelidze, D. Kekelidze, V. Aliyev, Investigation of  $\text{InP}_x\text{As}_{1-x}$  solid solutions and creation of the radiation-resistant materials on their basis, AIP Conf. Proc. Zurich, Switzerland, 1566(1), pp.101-102, 2013.  
<https://doi.org/10.1063/1.4848305>
- E. Khutsishvili, N. Kekelidze, T. Qamushadze, Z. Chubinishvili, N. Kobulashvili, and G. Kekelidze, InPAs Alloys Use for Electrical Engineering in Hard-radiation Environment, European Journal of Engineering and Technology Research. 6, pp.31-35, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.24018/ejers.2021.6.1.1749>
- E. Khutsishvili, B. Kvirkvelia, D. Kekelidze, V. Aliyev, D. Khomasuridze, L. Gabrichidze, Z. Guguchia, N. Kekelidze, Carriers Mobility of InAs- and InP- rich InAs-InP Solid Solutions Irradiated by Fast Neutrons, American Institute of Physics (AIP) Conference proceedings Conf. Proc. Zurich, Switzerland, 1566(1), pp.103-104, 2013.  
<https://doi.org/10.1063/1.4848306>
- N. Kekelidze, E. Khutsishvili, B. Kvirkvelia, D. Kekelidze, V. Aliyev, G. Kekelidze, Transport Properties of InAs-InP Solid Solutions, Journal of Electrical Engineering, 2, pp.207-212, 2014.  
doi:10.17265/2328-2223/2014.05.002
- E. Khutsishvili, N. Kekelidze, T. Qamushadze, Z. Chubinishvili, N. Kobulashvili, and G. Kekelidze, InPAs Alloys Use for Electrical Engineering in Hard-radiation Environment, European Journal of Engineering and Technology Research. 6, pp.31-35, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.24018/ejers.2021.6.1.1749>
- N. Kekelidze, E. Khutsishvili, Z. Kvinikadze, Z. Davitaja, D. Kekelidze, B. Kvirkvelia, K. Sadradze, L. Nadiradze, G. Kekelidze, Nanosize Clusters in InAs and InP Compounds and Their Solid Solutions  $\text{InP}_x\text{As}_{1-x}$ , American Journal of Nano Research and Applications, 5(3-1), pp. 48-55, 2017. <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/nano> doi:10.11648/j.nano.s.2017050301.21
- N. Kekelidze, G. Kekelidze. Inventor Certificate No. 89035 (1975). Moscow, USSR.