

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

მზია ტეტელოშვილი

ზოგიერთი იშვიათმიწა ელემენტის ჰალკოგენიდებისა და პნიქტიდების  
თხელი ფირების მიღება და ფიზიკური თვისებები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

აკტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა “საინჟინრო ფიზიკა”, შიფრი 0404

თბილისი

2015 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ფიზიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,  
პროფესორი ზაურ ჯაბუა

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2015 წლის \_\_\_ ივლისს, \_\_\_\_\_ საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის  
სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი \_\_IV\_\_, აუდიტორია \_\_401\_\_

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას ქ. 77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ - ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი \_\_\_\_\_ პროფესორი თ. კაიშაური

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**შესავალი.** იშვიათმიწა ელემენტების (იმე) სულფიდები, სელენიდები და ბისმუტიდები ხასიათდებიან მრავალფეროვანი და ხშირად არაჩვეულებრივი ფიზიკური თვისებებით. მათ საფუძველზე შექმნილია თერმოელექტრული გარდამქმნელები, წნევისა და მაგნიტური ველის გადამწოდები, ლუმინოფორები, ზედაბალი ტემპერატურის მისაღები სტრუქტურები და ა. შ. ეს შენაერთები, როგორც წესი, ძნელდნობადი მასალებია და, ამდენად, შეუძლიათ მუშაობა მაღალ ტემპერატურებზე. თავიანთი ელექტრული თვისებებით ისინი წარმოადგენენ ლითონებს, ნახევარლითონებს, ნახევარგამტარებს, დიელექტრიკებს. საერთოდ, უნდა აღინიშნოს, რომ იმე-ს შენაერთების თვისებების მრავალფეროვნება ძირითადად დაკავშირებულია იმე-ს ატომების ელექტრონული გარსის აგებულების თავისებურებებთან. კერძოდ, მათ გააჩნიათ შეუვსებელი 4f შიდა გარსი, რომელიც თანდათან ივსება ცერიუმიდან ლუტეციუმამდე გადასვლისას. ამასთან, ადგილი აქვს გარსის არსებით ლოკალიზაციას, რაც დაკავშირებულია 4f დონეების განლაგებით ატომის სიღრმეში და მათი ეკრანირებით გარეშე აღზნებისაგან გარე შრეზე განლაგებული  $5p^6 6s^2$  ელექტრონებით. შენაერთის წარმოქმნისას 4f შრეები ერთმანეთს არ გადაფარავენ, ვინაიდან მათი რადიუსები ძალიან მცირეა -  $\sim 0,04$  ნმ, რაც ატომებს შორის მანძილის მხოლოდ 0,1 ნაწილს შეადგენს, არამედ ქმნიან  $\sim 10^{28} \text{ მ}^{-3}$  კონცენტრაციის ლოკალიზებულ დონეებს და ჩვეულებრივ, ატომური დონეების მსგავსად იქცევიან. იმის და მიხედვით, თუ სად განლაგდებიან 4f დონეები, შენაერთები შეიძლება იყვნენ ლითონები, ნახევარგამტარები ან დიელექტრიკები. კერძოდ, შენაერთები წარმოადგენენ ლითონებს, თუ 4f დონე განთავსდა სავალენტო ზონაში, ნახევარგამტარებს - თუ ეს დონეები განლაგდა აკრძალულ ზონაში და დიელექტრიკებს - თუ ისინი განთავსდა გამტარებლობის ზონაში.

**თემის აქტუალობა.** იმე-ს ჰალკოგენიდები პერსპექტიული მასალებია მიკროელექტრონიკის, რადიოელექტრონიკის, კვანტური ელექტრონიკის

და ზოგადად, ელექტრონიკის მთელი რიგი სხვა დარგებისათვის. კერძოდ, მონოჰალკოგენიდები შეიძლება გამოყენებულ იქნან მახსოვრობის ელემენტების, ინფორმაციის წამკითხველი მოწყობილობის, მართვადი ტრანსფარანტების, მაგნიტური ველის-, წნევის-, ტენზო-გადამწოდების და სხვა ხელსაწყოების შესაქმნელად. ერთნახევრიანი სულფიდებს გააჩნიათ აკრძალული ზონის დიდი სიგანე და, ამდენად, წარმოადგენენ საინტერესო მასალებს სპექტრის ხილულ უბანში მომუშავე ოპტოელექტრონული ხელსაწყოების შესაქმნელად.

ბოლო პერიოდში განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა მცირე სიგანის აკრძალული ზონის მქონე ნახევარგამტარებსა და ნახევარლითონებს. ამ მხრივ მონობისმუტიდები წარმოადგენენ უნიკალურ მასალებს, რომლებსაც გარდა იმისა, რომ შეუძლიათ მუშაობა მაღალ ტემპერატურებზე, გააჩნიათ მხოლოდ მათთვის დამახასიათებელი თვისებები: ვიწრო ჰომოგენურობის არე, ნახევარგამტარული ენერგეტიკული ღრეზო და გამტარობის ლითონური ხასიათი, მუხტის მატარებელთა მაღალი კონცენტრაცია, დაბალი ძვრადობა. იმე-ს ბისმუტიდები წარმოადგენენ პერსპექტიულ რეზისტორულ მასალებს. ისინი წარმოადგენენ მაგნიტური მასალების ახალ კლასს და შეიძლება გამოყენებულ იქნან კრიოგენულ მოწყობილობებში მუდმივი მაგნიტების შესაქმნელად და ა.შ.

ისევე როგორც სხვა მასალების, იმე-ს შენაერთების შესწავლა და პრაქტიკული მიზნებისათვის გამოყენება მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ამ მასალების კრისტალურად სრულყოფილი ერთფაზა ნიმუშების მიღებასთან, მაგრამ დნობის მაღალი ტემპერატურების გამო, ეს ამოცანა დამაკმაყოფილებლად არ არის გადაწყვეტილი. ამდენად, ცხადია, აქტუალურია ისეთი ტექნოლოგიების დამუშავება, რომლებიც საშუალებას იძლევა გადალახულ იქნას ეს სიძნელებები. ერთ-ერთი ასეთი ტექნოლოგიაა ფირების მომზადება შედარებით მარტივი ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით. მით უმეტეს, რომ თხელფიროვანი ელექტრონიკა მოითხოვს განსაკუთრებული თვისებების მქონე ფიროვანი მასალების

ტექნოლოგიის საფუძვლების დამუშავებას, რომლის მიზანია ერთფაზა, სტექიომეტრიული შემადგენლობის, კრისტალურად სრულყოფილი ფირების მომზადება და მათი ფიზიკური თვისებების შესწავლა. ასევე, პრაქტიკული თვალსაზრისით დიდ ინტერესს წარმოადგენს ფირების სისქისა და მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების გავლენის შესწავლა მათ ფიზიკურ თვისებებზე, ვინაიდან, როგორც ცნობილია, ასეთი გავლენა შეიძლება მნიშვნელოვანი იყოს, რაც ხშირად განაპირობებს ფირების თვისებების განსხვავებას მოცულობითი ობიექტების თვისებებისაგან.

იმე-ს სულფიდების, სელენიდებისა და ბისმუტიდების თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია სუსტად არის დამუშავებული, ზოგჯერ კი საერთოდ არ არსებობს მონაცემები ზოგიერთი ამ შენაერთის ფირების მიღების, ლეგირების და სხვადასხვა ფიზიკური თვისებების შესახებ. ამდენად, იმე-ს სულფიდების, სელენიდებისა და ბისმუტიდების მაღალი კრისტალური სრულყოფის მქონე ერთფაზა, სტექიომეტრიული შემადგენლობის ფირების მიღება სხვადასხვა ფუძემრეზე, ლეგირება და ფიზიკური თვისებების შესწავლა აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს.

**სამუშაოს მიზანს** წარმოადგენდა იმე-ს ზოგიერთი სულფიდის, სელენიდისა და ბისმუტიდის თხელი ფირების მიღებისა და ლეგირების ტექნოლოგიის დამუშავება. მომზადებული ფირების მთელი რიგი ძირითადი ფიზიკური პარამეტრების დადგენა, რისთვისაც დისერტაციაში დასმული და გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები:

1)  $Tm_2S_3$ ,  $TmS$ ,  $TmSe$  და  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ ,  $LaBi$  და  $LaBi_2$  თხელი ფირების მომზადების ტექნოლოგიის დამუშავება სხვადასხვა ფუძემრეზე.

2) ფირების ფაზური შემადგენლობისა და კრისტალური მესრის სრულყოფის შესწავლა ტექნოლოგიური რეჟიმების პარამეტრებისაგან დამოკიდებულებით.

3)  $Tm_2S_3$  თხელი ფირების მალეგირებელი ელემენტის და ლეგირების მეთოდის შერჩევა. ლეგირებული ფირების ელექტრული და ფოტოელექტრული თვისებების შესწავლა.

4) TmS მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე დამოკიდებულების და მომზადებული ფირების ელექტროფიზიკური თვისებების მახასიათებელი ნაწილაკების ზომებზე დამოკიდებულების შესწავლა.

5) TmSe ელექტროფიზიკური პარამეტრების დამოკიდებულების შესწავლა ფირების სისქეზე.

6)  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ , LaBi და  $LaBi_2$  თხელი ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრების ტემპერატურაზე დამოკიდებულების შესწავლა.

7) TmSe, TmS და LaBi სხვადასხვა ფუძემრეზე დაფენილი თხელი ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცის შესწავლა. ერთსადიმავე ფუძემრეზე ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების სხვადასხვა მეთოდით მომზადებული TmSe ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცის შესწავლა.

#### ნაშრომის მეცნიერული სიახლე:

1) პირველად დამუშავებულია  $Tm_2S_3$  და TmS თხელი ფირების მომზადების ტექნოლოგია წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით, TmSe თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან და წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდებით,  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ , LaBi და  $LaBi_2$  თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით.

2) შესწავლილია ფირების მიღების ტექნოლოგიური რეჟიმების პარამეტრების გავლენა კრისტალური მესრის სრულყოფაზე, ფაზურ და ქიმიურ შემადგენლობაზე.

3) დამუშავებულია  $Tm_2S_3$  თხელი ფირების ლეგირების ტექნოლოგია Si ატომებით და შესწავლილია ლეგირებული ფირების ელექტრული და ფოტოელექტრული თვისებები.

4) შესწავლილია TmS ფირების მომზადების ტექნოლოგიური

პარამეტრების გავლენა მახასიათებელი ნაწილაკების ზომებზე და მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების გავლენა მომზადებული ფირების ელექტროფიზიკურ თვისებებზე.

5) შესწავლილია TmSe ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრების დამოკიდებულება ფირების სისქეზე. ოთახის ტემპერატურაზე ენერგიათა უბანში 0,5-4,0 ევ შესწავლილია TmSe-ის ფირების შთანთქმის სპექტრი.

6) შესწავლილია  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ , LaBi და  $LaBi_2$  თხელი ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრების ტემპერატურაზე დამოკიდებულება.

7) სრული გახეხვის მეთოდით შესწავლილია სხვადასხვა ფუძემდებზე (მონოკრისტალური სილიციუმი, სიტალი, ლეიკოსაფირონი) დაფენილი TmSe, TmS და LaBi ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე. ასევე შესწავლილია კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან და წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით ერთსადიმავე ფუძემდებზე მიღებული TmSe ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე.

**ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება:** სადისერტაციო ნაშრომში დამუშავებული იმე-ს სულფიდების, სელენიდებისა და ბისმუტიდების სრულყოფილი ერთფაზა კრისტალური თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია სხვადასხვა ფუძემდებზე შედარებით მარტივი ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით შეიძლება გამოყენებულ იქნას შესაბამისი ელექტრონული ხელსაწყოების დასამზადებლად.

მომზადებული ფირების ელექტრული, გალვანომაგნიტური და თერმოელექტრული თვისებების ტემპერატურული და ოპტიკური პარამეტრების სპექტრალური დამოკიდებულების შესწავლის შედეგები ხელს შეუწყობს იმე-ს შენაერთებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების კანონზომიერებისა და ბუნების შესახებ არსებული წარმოდგენების უფრო ღრმად გააზრებას, ხოლო მრავალი პირველად მიღებული ექსპერიმენტული შედეგი შეიძლება გამოყენებულ იქნას საცნობარო მასალად შესაბამისი დარგის ცნობარებში.

თულიუმის ერთნახევრიანი სულფიდის სილიციუმის ატომებით ლეგირებული ფირები პერსპექტიული მასალებია ფოტომგრძნობიარე სტრუქტურების შესაქმნელად.

**დაცვაზე გამოგვაქვს შემდეგი ძირითადი შედეგები:**

1)  $Tm_2S_3$  და  $TmS$  თხელი ფირების მომზადების ტექნოლოგია წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით,  $TmSe$  თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან და წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდებით,  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ ,  $LaBi$  და  $LaBi_2$  თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით. ფირების მიღების ტექნოლოგიური რეჟიმების პარამეტრების გავლენის შესწავლის შედეგები ფირების ფაზურ და ქიმიურ შემადგენლობაზე, კრისტალური მესრის სრულყოფაზე.

2)  $Tm_2S_3$  თხელი ფირის სტაბილური ელექტროფიზიკური თვისებების განმაპირობებელი მალეგირებელი ელემენტის შერჩევა, ლეგირების მეთოდის დამუშავება და ლეგირებული მასალების ელექტრული და ფოტოელექტრული თვისებები.

3)  $TmS$  მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე და მომზადებული ფირების ელექტროფიზიკური თვისებების მახასიათებელი ნაწილაკების ზომებზე დამოკიდებულების შესწავლის შედეგები.

4)  $TmSe$  თხელი ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრების დამოკიდებულება ფირების სისქეზე. ფირების შთანთქმის კოეფიციენტის სპექტრალური დამოკიდებულება.

5)  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ ,  $LaBi$  და  $LaBi_2$  თხელი ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრების ტემპერატურაზე დამოკიდებულება.

6)  $TmSe$ ,  $TmS$  და  $LaBi$  თხელი ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე.



ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული და განხილული იყო: საერთაშორისო კონფერენციაზე „ნანოსენსორული სისტემები და ნანომასალები“ (თბილისი, 2013წ.), სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია (თბილისი, 2013წ.), საერთაშორისო კონფერენციაზე „ბირთვული რადიაციული ნანოსენსორები და ნანოსენსორული სისტემები“ (თბილისი, 2014 წ.), მესამე საერთაშორისო კონფერენციაზე „ნანოტექნოლოგიები“ (თბილისი, 2014 წ.), სტუდენტთა 83-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე (თბილისი, 2015წ.)

პუბლიკაციები: სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 9 სამეცნიერო ნაშრომში, რომელთა ნუსხაც მოყვანილია ავტორეფერატის ბოლოში.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალის, ოთხი თავის, დასკვნებისა და ციტირებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. ნაშრომის საერთო მოცულობა შეადგენს 168 გვერდს, მათ შორის 155 ნაბეჭდი გვერდი, 79 ილუსტრაცია, 14 ცხრილი და 109 დასახელების ციტირებული ლიტერატურა.

## **სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შინაარსი**

პირველ თავში მიმოხილულია სამეცნიერო ლიტერატურა იმე-ს ჰალკოგენიდების და პნიქტიდების შესახებ. კერძოდ, მოყვანილია სადისერტაციო ნაშრომის თემატიკასთან დაკავშირებული იმე-ს სულფიდების, სელენიდებისა და ბისმუტიდების შემადგენლობა-ტემპერატურა მდგომარეობის დიაგრამები, ამ მასალების მოცულობითი და თხელფიროვანი ობიექტების ელექტროფიზიკური, ოპტიკური, მექანიკური თვისებები, ასევე მონაცემები კრისტალური სტრუქტურის შესახებ. სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვიდან ჩანს, რომ იმე-ს ჰალკოგენიდები და პნიქტიდები წარმოადგენენ მნიშვნელოვან ინტერესს როგორც მათი პრაქტიკაში გამოყენების, ასევე მყარი ტანის მრავალი

პრობლემური საკითხის ახლებურად გააზრების მიზნით. სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვიდან ჩანს, რომ ამ მასალების მოცულობითი ობიექტების ტექნოლოგია და თვისებები შედარებით კარგად არის შესწავლილი, რასაც ვერ ვიტყვით თხელფიროვანი ობიექტების შესახებ, რომლებიც განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენენ მიკროელექტრონიკისათვის. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ხშირად თხელფიროვანი მასალების თვისებები მნიშვნელოვნად განსხვავდება მოცულობითი ობიექტების თვისებებისაგან და ამდენდ ისინი დამატებით ინტერესს იწვევენ.

ცნობილია, რომ იმე-ს ერთნახევრიან სულფიდებს გააჩნიათ მაღალი კუთრი წინაღობა, რაც ზოგიერთ შემთხვევაში ზღუდავს მათი გამოყენების შესაძლებლობას მიკროელექტრონულ ხელსაწყოებში და ამდენად, საინტერესოა მათთვის ისეთი მალეგირებელი ელემენტების შერჩევა, რომლებიც შეამცირებენ კუთრი წინაღობას. ლიტერატურის მიმოხილვიდან ჩანს, რომ იმე-ს ზოგიერთი ერთნახევრიანი სულფიდის ლეგირების ტექნოლოგია დამუშავებულია, მაგრამ ლეგირებულ ფირებს ახასიათებთ დაბალი მდგრადობა გახურება-გაცივების ციკლის მიმართ და ამიტომ ასევე აქტუალურია ისეთი მალეგირებელი ელემენტების შერჩევა, რომლებიც უზრუნველყოფენ მდგრადობას აღნიშნული გახურება-გაცივების ციკლის მიმართ.

ბოლო ხანებში დიდი ყურადღება ექცევა ელექტრონიკისათვის პერსპექტიული მასალების მექანიკური თვისებების ცოდნას, თუმცა სამეცნიერო ლიტერატურაში ასეთი მონაცემები ძალზე მწირია.

ნაშრომის მეორე თავში მოკლედ აღწერილია თხელი ფირების მისაღები თანამედროვე ტექნოლოგიური, მაკონტროლებელი და ფიზიკური თვისებების გასაზომი მოწყობილობები და გაზომვის მეთოდიკა. განსაკუთრებული ყურადღება აქვს დათმობილი თხელი ფირების მიღებას ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით. დეტალურადაა განხილული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით ფირების

მიღების ისეთი ფართოდ გავრცელებული სახესხვაობები, როგორებიცაა ფირების მიღება კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან და წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული აორთქლების მეთოდები. ამავე თავში მოყვანილია ფუძემდებებისადმი წაყენებული მოთხოვნები და მათი გაწმენდის მეთოდიკა; ფირების სისქის გაზომვის მეთოდები; ფირების რენტგენოდიფრაქციული, ელექტრონოგრაფიული, ქიმიური შემადგენლობის, ელექტროფიზიკური თვისებების კვლევის მეთოდები; ოპტიკური სპექტრების გამოსაკვლევი დანადგარებისა და გაზომვის მეთოდიკის აღწერა; ლეგირებული ფირების ფოტოელექტრული თვისებების შესასწავლი მოწყობილობები.

ფირების მიღება ხდებოდა მოდერნიზებულ სამრეწველო დანადგარებზე ВУП-5, УВН-2У, УВН-75Р3. ფირების სისქის გაზომვა ხდებოდა МИИ-4 ინტერფერენციული მიკროსკოპით, ხოლო ფაზური შემადგენლობის და კრისტალოზობის კონტროლი ხორციელდებოდა რენტგენოდიფრაქციული და ელექტრონოგრაფიული მეთოდებით, შესაბამისად, ДРОН-1 მარკის დიფრაქტომეტრსა და УЭМВ-100К მარკის ელექტრონულ მიკროსკოპზე. ფირების ქიმიური შემადგენლობის კონტროლი სწარმოებდა "CAMEBAX-MICROBEAM" მარკის რენტგენული მიკროანალიზის დანადგარზე PDP11/73 ეგმ-ის გამოყენებით. კუთრი წინალობის, ჰოლის მუდმივას და თერმო ემმ-ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გაზომვა ხდებოდა დანადგარებზე, რომლებიც ამ თავში დეტალურადაა აღწერილი. კუთრი წინალობისა და თერმო ემმ-ს გაზომვის სიზუსტე შეადგენდა 3-4%-ს, ხოლო ჰოლის მუდმივასი 8-10%-ს. ფოტოელექტრული თვისებების შესწავლა სწარმოებდა ИКМ-1 მონოქრომატორის ბაზაზე აწყობილ დანადგარზე, ხოლო შთანთქმის სპექტრის გაზომვა ხორციელდებოდა КСВУ-2 სპექტრალურ გამომთვლელ კომპლექსზე. ამ თავში დეტალურადაა აღწერილი ყველა ამ დანადგარის მუშაობის პრინციპი, პარამეტრები, გაზომვებისა და მიღებული შედეგების დამუშავების მეთოდიკები.

მესამე თავის დასაწყისი მთლიანად დათმობილი აქვს ვაკუუმურ-თერმული აორთქლებით თხელი ფირების მიღების მეთოდებს და ტექნოლოგიურ თავისებურებებს. ამ თავში დაწვრილებითაა განხილული ისეთი საკითხები, როგორებიცაა: ნივთიერების აორთქლება და განაწილება ფუძემშრეზე, ფირების წარმოქმნის კინეტიკა და სტრუქტურა; სხვადასხვა პარამეტრების გავლენა ფირების სტრუქტურაზე; ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით ფირების მიღების სახესხვაობები, კერძოდ, აღწერილია ფირების მიღება შემადგენელი კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლებისა და წინასწარსინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდებით. მათი შედარების საფუძველზე გაკეთებულია შესაბამისი დასკვნები, რომლებიც საშუალებას იძლევა კონკრეტული შენაერთის თხელი ფირების მიღებისას სწორად იქნას შერჩეული ის მეთოდი, რომლის მეშვეობითაც მიიღება სტექიომეტრიული შემადგენლობის, ერთფაზა, კრისტალურად სრულყოფილი ფირი.

ამავე თავში მოყვანილია თულიუმის ერთნახევრიანი და მონოსულფიდის, მონოსელენიდის და ლანთანის მონობისმუტიდების თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგიური რეჟიმების პარამეტრები. ასევე თულიუმის ერთნახევრიანი სულფიდის მალეგირებელი ელემენტების შერჩევისა და ლეგირების მეთოდის დამუშავების საკითხები. ფირების მიღება სწარმოებდა  $\sim 10^{-6}$  მმ ვწყ. სვ ვაკუუმის პირობებში, ფუძემშრეებად გამოყენებული იყო მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმის მონოკრისტალური სილიციუმის, სიტალის, ლეიკოსაფირონის და კვარცის ფირფიტები  $15 \times 8 \times 0,5$  მმ, რომელთა ზედაპირის უსწორმასწორობის ზომა არ აღემატებოდა 0,01 მმ-ს.

საწყის მასალებს წარმოადგენენ: 1) TyM-1 მარკის Tm, მასში კონტროლირებადი მინარევების შემდეგი შემცველობით: La - 0.03%, Fe - 0.01%, Ca - 0.01%, Cu - 0.01% და Er, Yb და Lu ჯამური შემცველობით 0.1%, Ta, Mo ან Nb ჯამური შემცველობით 0.02%); 2) La-0 მარკის ლითონური La,

Fe-ის შემცველობით – 0,02% და Ce, Pr და Nd ჯამური შემცველობით - 0,2%;  
3)Bi -0000 მარკის ბისმუტი, ძირითადი მასალის შემცველობით 99.9999%,  
4)OCY მარკის სელენი, ძირითადი მასალის შემცველობით 99.9999%; 5)Kp00  
მარკის სილიციუმი, ძირითადი მასალის შემცველობით 99.99%;  
6)დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლებისათვის საჭირო  
წინასწარსინთეზირებული შენაერთები  $\theta$ -  $Tm_2S_3$ ,  $TmS$ ,  $TmSe$  შეძენილ იქნა  
კომპანია Rare Earth Bullion Ltd (Company No:08175229)-გან.

წინამდებარე ნაშრომში  $\theta$  -  $Tm_2S_3$  და  $TmSe$ -ის ფირების მიღება  
ხდებოდა წინასწარსინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-  
თერმული აორთქლებით, რომლის არსი მდგომარეობს ამორთქლებელზე  
შენაერთის ფხვნილის გარკვეული ულუფებით მიწოდებასა და ორთქლის  
ფუძემრეზე კონდენსაციაში. ამ მეთოდის წარმატებით  
განხორციელებისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს ამორთქლებლის და  
ფუძემრის ტემპერატურებისა და მათ შორის ოპტიმალური მანძილის  
შერჩევას. ასევე ამორთქლებელზე მიწოდებული ფხვნილის მარცვლების  
ზომას.  $\theta$  -  $Tm_2S_3$  -ის შემთხვევაში ამორთქლებლის ოპტიმალური  
ტემპერატურა ტოლი იყო 2800K, ფუძემრის - 870-920K, მარცვლის ზომები  
100-130მკმ, მანძილი ამორთქლებლიდან ფუძემრემდე 55 მმ.  $TmS$ -ის  
შემთხვევაში ამორთქლებლის ტემპერატურა შეადგენდა 2750K, ფუძემრის -  
935-1120K, ფხვნილის მარცვლების ზომა - 80-90 მკმ, მანძილი  
ამორთქლებლიდან ფუძემრემდე 70 მმ.  $TmSe$ -ის შემთხვევაში  
ამორთქლებლის ტემპერატურა შეადგენდა 2750K, ფუძემრის - 620K,  
ფხვნილის მარცვლების ზომა - 85-100 მკმ, მანძილი ამორთქლებლიდან  
ფუძემრემდე 68 მმ. აღწერილი მეთოდით მომზადებულ  $\theta$ -  $Tm_2S_3$ -ის ფირებს  
გააჩნდათ  $Tl_2O_3$  ტიპის კუბური მესერი, მესრის მუდმივათი  $a = 12.44\text{\AA}$ ,  $TmS$ -  
ის და  $TmSe$ -ის ფირებს გააჩნდათ  $NaCl$ -ის ტიპის კუბური მესერი,  
შესაბამისად პარამეტრებით  $a = 5.39\text{\AA}$  და  $a = 5.62\text{\AA}$ .

დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლებით მიღებული  
ფირების ტექნოლოგიური რეჟიმები და რენტგენოგრაფიული და

მიკროზონდური კვლევის შედეგები მოყვანილია ცხრილ 1-ში.

ცხრილი 1

დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით  $\theta$ -  $Tm_2S_3$ -ის  $TmS$ -ისა და  $TmSe$ -ის ფირების მიღების ოპტიმალური ტექნოლოგიური რეჟიმები, რენტგენოდიფრაქციული, ელექტრონოგრაფიული და მიკროზონდური კვლევის შედეგები.

შენაერთი	$T_{ფ}$ , K	$T_{აფ}$ , K	d, მმ	ფხილის მარცვლების ზომა, მკმ	ფირის დაფენის სიჩქარე, Å/წმ.	სინგონია	სტრუქტურული ტიპი	მესრის პარამეტრი a, Å	კომპონენტების შემცველობა, ატ%
$\theta$ - $Tm_2S_3$	870-920	2800	55	100-130	90-105	კუბური	$Tl_2O_3$	a=12.44	Tm 40.1 S 59.9
$TmS$	935-1120	2750	70	80-90	68-75	„	NaCl	a=5.39	Tm 50.2 S 49.8
$TmSe$	620	2750	68	85-100	70-85	„	NaCl	a=5.62	Tm 50.1 Se 49.9

$T_{ფ}$  - ფუძეშრის ტემპერატურა;  $T_{აფ}$  - შენაერთის ამაორთქლებლის ტემპერატურა; d - მანძილი ამაორთქლებლიდან ფუძეშრემდე;  $\alpha$  - კუთხე ამაორთქლებლის ღერძსა და ფუძეშრის ნორმალს შორის.

მოცემულ ნაშრომში ასევე დამუშავებულ იქნა  $TmSe$ ,  $La_2Bi$ ,  $La_5Bi_3$ ,  $La_4Bi_3$ ,  $LaBi$  და  $LaBi_2$  ფირების მომზადების ტექნოლოგია კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით. ვერ მოხერხდა  $La_2Bi$  ერთფაზა ფირების მიღება, დანარჩენი შენაერთების ფირების მომზადების ოპტიმალური ტექნოლოგიური პარამეტრები და ამ ფირების რენტგენოგრაფიული და მიკროზონდური კვლევის შედეგები მოცემულია ცხრილ 2-ში.

კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით  $TmSe$ ,  $La_5Bi_3$ ,  $La_4Bi_3$ ,  $LaBi$ ,  $LaBi_2$  ფირების მიღების ოპტიმალური ტექნოლოგიური რეჟიმები, რენტგენოგრაფიული, ელექტრონოგრაფიული და რენტგენული მიკროზონდური კვლევის შედეგები

შენაერთი	$T_g, K$	$T_{ფიქ}, K$	$T_{Se,Bi}, K$	$d_{ფიქ}, მმ$	$d_{Se,Bi}, მმ$	$\alpha_{ფიქ}$	$\alpha_{S,Sn,Te}$	ფირის დაფენის სიჩქარე, $\text{Å}/წმ$ .	სინგონია	სტრუქტურული ტიპი	მესრის პარამეტრი a, Å	კომპონენტების შემცველობა, ატ%
$TmSe$	1100	1230	630	40	35	40	40	37	კუბური	NaCl	a=5.62	Tm 50.1 S 49.9
$La_5Bi_3$	1120	1895	1050	50	75	40	57	65	ჰექსაგ.	$Mn_5Si_3$	a=9.58 c=6.70	La 62,4 Bi 37,6
$La_4Bi_3$	1110	1880	1065	54	70	38	55	50	კუბური	ანტი- $Th_3P_4$	a=9.77	La 57,1 Bi 42,9
$LaBi$	1130	1890	1060	62	77	45	59	78	„	NaCl	a=6,52	La 50,0 Bi 50,0
$LaBi_2$	1125	1880	1055	73	65	57	50	65	რომბ.	$LaBi_2$	a=6.17 b=6.04 c=17.83	La 33.2 Bi 66.8

$T_g$  - ფუძემშრის ტემპერატურა;  $T_{ფიქ}$  - იმე-ს ამორთქლებლის ტემპერატურა;  $T_{Se,Bi}$  - სელენის და ბისმუტის ამორთქლებლის ტემპერატურა გოგირდის, ანთიმონის, ტელურის ამორთქლებლის ტემპერატურა;  $d_{ფიქ}$  - მანძილი იმე-ს ამორთქლებლიდან ფუძემშრემდე;  $d_{Se,Bi}$  - მანძილი სელენისა და ბისმუტის, ამორთქლებლიდან ფუძემშრემდე;  $\alpha_{ფიქ}$  - კუთხე იმე-ს ამორთქლებლის ღერძსა და ფუძემშრის ნორმალს შორის;  $\alpha_{Se,Bi}$  - კუთხე სელენისა და ბისმუტის ამორთქლებლების ღერძსა და ფუძემშრის ნორმალს შორის.

$Tm_2S_3$ ,  $TmS$  და  $LaBi$  ფირების ზედაპირზე გადაღებულ იქნა შემადგენელი კომპონენტების განაწილების სურათი რენტგენის მეორად სხივებში, რომლებმაც აჩვენეს რომ მათში ელემენტები განაწილებულია საკმაოდ ერთგვაროვნად.

მესამე თავში ასევე მოყვანილია  $\theta$ -  $Tm_2S_3$ -ის ფირების მალეგირებელი ელემენტების და ლეგირების მეთოდის შერჩევა და ლეგირების რეჟიმები. ადრე სტუ-ს ახალი ნახევარგამტარი მასალების ლაბორატორიაში

ჩატარებულ იქნა კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით მომზადებული  $\theta$ - $Tm_2S_3$ -ის ფირების ლეგირება ტყვიით. ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ მიუხედავად იმისა, რომ ლეგირებულ ფირებს გააჩნდათ საკმაოდ საინტერესო ელექტროფიზიკური და ფოტოელექტრული პარამეტრები, მათ აღმოაჩნდათ მნიშვნელოვანი ნაკლი. კერძოდ, ფირების თხევადი აზოტის ტემპერატურიდან 500K-მდე გახურება-გაცივების 10-12 ციკლის შემდეგ ისინი კარგავდნენ ფოტომგრძობიარობას და აღიდგენდნენ საწყის მაღალ კუთრ წინააღმდეგობას. ამდენად, აქტუალური იყო ისეთი მალეგირებელი ელემენტების შერჩევა, რომლებიც, ერთის მხრივ, უზრუნველყოფენ ფირების დაბალ ელექტროწინააღმდეგობას, მაღალ ფოტომგრძობიარობას და სტაბილურობას გახურება-გაცივების ციკლის მიმართ. ასეთ მალეგირებელ ელემენტად გეომეტრიული, ელექტროქიმიური და სხვა ფაქტორების გათვალისწინებით შერჩეულ იქნა სილიციუმი, რომლის კოვალენტური რადიუსი გაცილებით ნაკლებია ტყვიის კოვალენტურ რადიუსზე. სილიციუმით ლეგირებისათვის  $\theta$  -  $Tm_2S_3$  -ის ფირებზე ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით ვაფენდით 2,5-3,0 მკმ სისქის ფენას ელექტრონულ-სხივური აორთქლების მეთოდით და ვაწარმოებდით ფირის გამოწვას სპექტრალურად სუფთა არგონით გავსებულ კვარცის ამპულაში 18-25 საათის განმავლობაში 900K ტემპერატურაზე. ლეგირების პროცესის დასრულების შემდეგ ფირის ზედაპირს მექანიკურად ვაშორებდით ნარჩენ პროდუქტებს და ვაწარმოებდით მომზადებული ფირების რენტგენოდიფრაქციულ და ელექტრონოგრაფიულ კვლევას, რომლებმაც აჩვენეს, რომ ლეგირებულ ფირებში ახალი ფაზების გაჩენას ადგილი არ აქვს.

მეოთხე თავი ეხება მომზადებული ფირების ფიზიკური თვისებების კვლევასა და მიღებული შედეგების განხილვას. კერძოდ, მოყვანილია თულიუმის ერთნახევრიანი სულფიდის სილიციუმით ლეგირებული ფირების ელექტროფიზიკური და ფოტოელექტრული თვისებები.



ნაჩვენებია, რომ ყველა ლეგირებული ფირი ელექტრონული გამტარობისაა და ლეგირებული ფირების კუთრი წინაღობა  $\sim 10^6$  – ჯერ ნაკლებია ლეგირებამდე ფირების კუთრ წინაღობასთან შედარებით.

ცხრილ 3-ში მოყვანილია  $Tm_2S_3$  სილიციუმით ლეგირებული თხელი ფირების ზოგიერთი პარამეტრი ლეგირებამდე და ლეგირების შემდეგ.

ცხრილი 3

თულიუმის ერთნახევრიანი სულფიდის თხელი ფირების სილიციუმით ლეგირების ექსპერიმენტალური შედეგები

დიფუზიური გამოწვის ტემპერატურა, K	დიფუზიური გამოწვის ხანგრძლივობა, სთ	ფირის სისქე, მკმ	კუთრი წინაღობა ლეგირებამდე, ომი · მ	კუთრი წინაღობა ლეგირების შემდეგ, ომი · მ	ფერი ლეგირების შემდეგ	გამტარობის ტიპი ლეგირების შემდეგ
900	25	1.4	$10^8$	100	მოშავო- ყავისფერი	n
„	18	1.7	“	97	„	“
„	22	1.6	“	103	„	“
„	24	1.9	“	102	„	“
„	20	2.0	“	98	„	“

ლეგირებული ფირების კუთრი წინაღობის ტემპერატურაზე (95 – 500K ტემპერატურულ შუალედში) დამოკიდებულების მრუდიდან დადგენილ იქნა, რომ სილიციუმის მინარევული ატომის იონიზაციის ენერგია, ის ტოლია  $\sim 0.32$  ევ-ის. ამავე შუალედში თერმო ემ-ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულების შესწავლამ აჩვენა, რომ ტემპერატურის გაზრდით ოთახის ტემპერატურამდე თერმო ემ-ს საკმაოდ სწრაფად იზრდება, ხოლო შემდეგ ზრდის ტემპი რამდენადმე ნელდება.

შესწავლილ იქნა ლეგირებული ფირების ფოტოგამტარებლობისა და ფოტოელექტრომამოძრავებელი ძალის სპექტრალური დამოკიდებულება ფოტონების ენერგიათა უბანში 0 – 3.5 ევ და 95 – 300 K ტემპერატურულ შუალედში. კვლევებმა აჩვენეს, რომ ფოტოგამტარობის და ფოტო ემ-ს

სპექტრალური დამოკიდებულების მრუდებზე  $\sim 0.51$  ევ ენერგიაზე არსებობენ კარგად გამოკვეთილი პიკები. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ეს პიკები შეესაბამებიან სილიციუმის დონორული დონის ძირითად ენერგიას. ამას გარდა 95K-ზე ფოტოგამტარობის სპექტრალური დამოკიდებულების მრუდზე  $\sim 0,47$  ევ-ზე შეიმჩნევა უფრო დაბალი ინტენსივობის პიკი, რომელიც ტემპერატურის გაზრდით ქრება. შესაძლებელია დავუშვათ, რომ ეს უკანასკნელი პიკი დაკავშირებული იყოს სილიციუმის დონორული დონის აღზნებასთან. შესაბამისად ინტერვალის სილიციუმის პირველ აგზნებულ და ძირითად მდგომარეობებს შორის შეადგენს 0,04 ევ.

როგორც ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, სილიციუმით ლეგირებული ფირების რამოდენიმე ათეულჯერ (სულ ჩატარებულ იქნა 120-მდე ცდა) გახურება-გაცივების ციკლი 95-500 K ტემპერატურულ ინტერვალში არ იწვევს ფირის საწყისი მაღალი კუთრი წინაღობის აღდგენას და ფოტომგრძობიარობის დაკარგვას, რაც პერსპექტიულს ხდის ლეგირებული ფირების გამოყენებას ფოტომგრძობიარე სტრუქტურების შესაქმნელად.

ოთახის ტემპერატურაზე TmS-ის თხელ ფირებზე შესწავლილია კუთრი წინაღობისა და ჰოლის მუდმივას დამოკიდებულება ფირის მახასიათებელი ნაწილაკების ზომებზე. ნაჩვენებია, რომ მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების გაზრდით კუთრი წინაღობა იზრდება, ასევე დადგენილ იქნა წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტის დამოკიდებულება ნაწილაკების ზომებზე, რომლის მიხედვითაც ამ ზომების გაზრდით წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი მნიშვნელოვნად იზრდება  $\sim 2 \cdot 10^{-4} K^{-1}$  – დან  $50 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ -მდე. ჰოლის მუდმივას გააჩნია უარყოფითი ნიშანი და ნაწილაკების ზომების გადიდება იწვევს მის გაზრდას. ერთზონიანი მიახლოებით დათვლილ იქნა ელექტრონების კონცენტრაცია, რომელმაც აჩვენა, რომ ნაწილაკების ზომების გაზრდა იწვევს ელექტრონების კონცენტრაციის შემცირებას, რაც თავის მხრივ, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ზრდის წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტის სიდიდეს.

ამრიგად, ჩატარებული გაზომვებიდან ჩანს, რომ თულიუმის მონოსულფიდის თხელი ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრები ძლიერ არის დამოკიდებული ფირების შემადგენელი ნაწილაკების ზომებზე.

ოთახის ტემპერატურაზე გაზომილია თულიუმის მონოსელენიდის ჩვენს მიერ მომზადებული ფირების ელექტროგამტარობისა და ჰოლის ძვრადობის დამოკიდებულება ფირის სისქეზე. ნაჩვენებია, რომ გარკვეულ ფარგლებში ფირის სისქის გაზრდით ელექტროგამტარობა ჯერ იზრდება, ხოლო შემდეგ აღწევს მუდმივ მნიშვნელობას და აღარ იცვლება. ანალოგიური სურათი დაიმზირება მუხტის გადამტანების - ელექტრონებისთვისაც. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ ეს გამოწვეულია ზომითი ეფექტებით.

ოთახის ტემპერატურაზე ფოტონების ენერჯიათა შუალედში 0,5-4 ევ შესწავლილია თულიუმის მონოსელენიდის ფირების შთანთქმის სპექტრი. ნაჩვენებია, რომ შთანთქმის სპექტრი შეიცავს ენერჯიით ერთმანეთისაგან განსხვავებულ ოთხ ზოლს. ჩატარებულია მიღებული შედეგების ანალიზი.

$\text{LaBi}_2$ ,  $\text{La}_4\text{Bi}_3$ ,  $\text{La}_5\text{Bi}_3$  და  $\text{LaBi}$  მომზადებულ ფირებზე ტემპერატურულ დიაპაზონში 95 – 500 K გაზომილია კუთრი წინალობისა და თერმო-ემმ-ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულება, ხოლო ოთახის ტემპერატურაზე - ჰოლის მუდმივა. ნაჩვენებია, რომ ტემპერატურის გაზრდით ყველა ფირის კუთრი წინალობა იზრდება, ამასთან  $\text{LaBi}$  ფირის წინალობა რამდენადმე სწრაფად, ხოლო დანარჩენი ფირების  $\text{LaBi}_2$ ,  $\text{La}_4\text{Bi}_3$ ,  $\text{La}_5\text{Bi}_3$  ნელა და წრფივად. რაც შეეხება თერმო-ემმ-ს  $\text{LaBi}$  და  $\text{La}_4\text{Bi}_3$  ფირების თერმო-ემმ-ს აბსოლუტური მნიშვნელობები ტემპერატურის გაზრდით არაწრფივად მცირდება, ხოლო  $\text{LaBi}_2$  და  $\text{La}_5\text{Bi}_3$  ფირების - სუსტად და წრფივად იზრდება.

ერთზონიანი მიახლოებით გაანგარიშებულია მუხტის მატარებლების კონცენტრაცია და ძვრადობა. ჰოლის მუდმივასა და თერმო-ემმ-ს ნიშნის მიხედვით შეიძლება დავასკვნათ, რომ ყველა მომზადებული ფირი ელექტრონული გამტარობისაა.

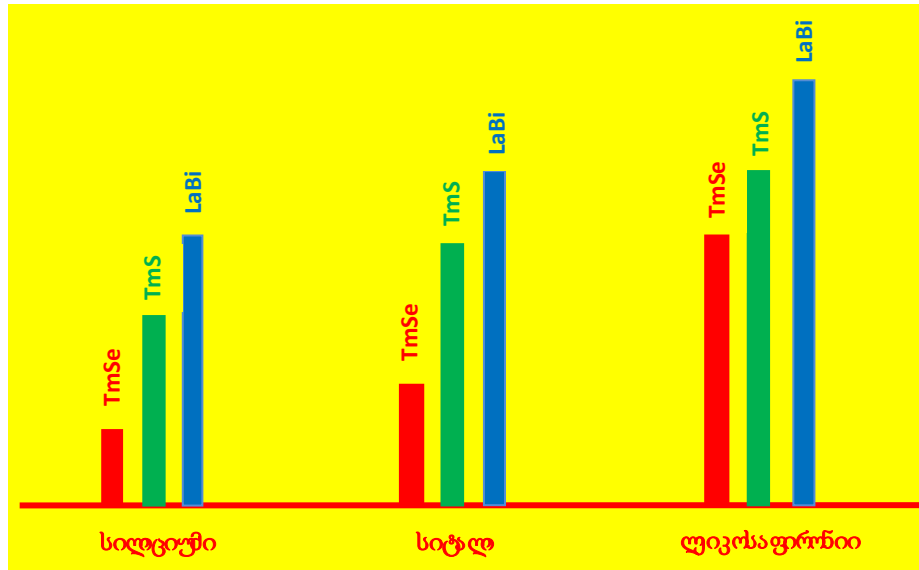
მოყვანილი გაზომვის შედეგები მეტყველებს, რომ ყველა მომზადებული ფირი თავიანთი ელექტროფიზიკური თვისებებით ახლოსაა ლითონურთან.

ფირების ელექტრული და ოპტიკური თვისებების შესწავლასთან ერთად უკანასკნელ ხანებში დიდი ყურადღება ექცევა მათი მექანიკური თვისებების კვლევას. მიზეზი მდგომარეობს იმაში, რომ ხშირად საინტერესო ელექტრული, ოპტიკური და სხვა თვისებების მქონე მასალებს გააჩნიათ დაბალი მექანიკური სიმტკიცე რაც სერიოზულად ზღუდავს მათ პრაქტიკულ გამოყენებას.

წინამდებარე ნაშრომში ფირების მექანიკური სიმტკიცე შესწავლილ იქნა ე.წ. სრული გახეხვის მეთოდით, რომლის არსი მდგომარეობს ერთი და იმავე სისქის ფირებზე ერთი და იმავე დატვირთვის პირობებში გასმათა რიცხვის დადგენაში, რომელიც საჭიროა ფუძემდრდან ფირის სრული გადახეხვისათვის. შესწავლილ იქნა სილიციუმის, სიტალისა და ლეიკოსაფირონის ფუძემრეზე დაფენილი თულიუმის მონოსელენიდისა და მონოსულფიდის და ლანთანის მონობისმუტიდის ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე. ნაჩვენებია, რომ ერთსა და იმავე ფუძემრეზე დაფენილი ფირების სიმტკიცე იზრდება მიმდევრობით:  $TmSe - TmS - LaBi$ , ხოლო სხვადასხვა ფუძემრეზე დაფენილი ფირების - მიმდევრობით: სილიციუმი - სიტალი - ლეიკოსაფირონი (ნახ.1).

გამოთქმულია მოსაზრება, რომ ასეთი დამოკიდებულება განპირობებულია ფირებისა და ფუძემრის მასალების სითბური გაფართოების კოეფიციენტების განსხვავებით.

თულიუმის მონოსელენიდის მაგალითზე ნაჩვენებია, რომ წინასწარსინთეზირებული მასალის დისკრეტული აორთქლების მეთოდით მიღებული ფირების სიმტკიცე უფრო მაღალია, ვიდრე კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან აორთქლების მეთოდით მიღებული ფირების სიმტკიცე.



ნახ.1. TmSe, TmS და LaBi სხვადასხვა ფუძეშრეზე დაფენილი ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე

### დასკვნები

ნაშრომში შესრულებული სამუშაოს შედეგები შეიძლება ჩამოვყალიბოთ შემდეგი ძირითადი დასკვნების სახით:

1) პირველად დამუშავებულია  $Tm_2S_3$  და  $TmS$  თხელი ფირების მომზადების ტექნოლოგია წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით,  $TmSe$  თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან და წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდებით,  $La_4Bi_3$ ,  $La_5Bi_3$ ,  $LaBi$  და  $LaBi_2$  თხელი ფირების მიღების ტექნოლოგია ორი დამოუკიდებელი წყაროდან ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით.

ნაჩვენებია, რომ ფუძეშრის მასალა (ნადნობი კვარცი, მონოკრისტალური სილიციუმი, სიტალი, ლეიკოსაფრონი) შესამჩნევ გავლენას არ ახდენს მომზადებული ფირების კრისტალურ სტრუქტურასა და ფაზურ შემადგენლობაზე.

ჩატარებულია  $Tm_2S_3$  ფირების ლეგირება სილიციუმის ატომებით მყარი ფაზიდან.

2) ჩატარებულია მომზადებული ფირების რენტგენოგრაფიული და ელექტრონოგრაფიული ანალიზი. ნაჩვენებია, რომ  $Tm_2S_3$  ფირებს გააჩნიათ  $Tl_2O_3$  ტიპის კუბური მესერი, მესრის მუდმივათი  $a = 12,44 \text{ \AA}$ ,  $TmS$  ფირებს -  $NaCl$ -ის ტიპის კუბური მესერი პარამეტრით  $a = 5,39 \text{ \AA}$ ,  $TmSe$  ფირებს ასევე გააჩნიათ  $NaCl$ -ის ტიპის კუბური მესერი პარამეტრით  $a = 5,62 \text{ \AA}$ ,  $La_5Bi_3$  ფირებს - ჰექსაგონალური მესერი პარამეტრებით  $a=9.58 \text{ \AA}$  და  $c=6.70 \text{ \AA}$ ,  $La_4Bi_3$  ფირებს - ანტი- $Th_3P_4$  ტიპის კუბური მესერი პარამეტრით  $a=9.71 \text{ \AA}$ ,  $LaBi$  ფირებს -  $NaCl$ -ის ტიპის კუბური მესერი პარამეტრით  $a = 5,62 \text{ \AA}$ , ხოლო  $LaBi_2$  ფირებს გააჩნიათ რომბული მესერი, მესრის მუდმივებით  $a = 6.17 \text{ \AA}$ ,  $b=6.04 \text{ \AA}$ ,  $c=17.83 \text{ \AA}$ .

3) რენტგენული მიკროზონდური ანალიზის მიხედვით ყველა მომზადებული ფირის შემდგენლობა ახლოსაა სტექიომეტრიულთან კერძოდ:  $Tm_2S_3$ -ის ფირები შეიცავენ 40,1 ატ%  $Tm$  და 59,9 ატ%  $S$ ,  $TmS$ -ის ფირები - 50,2 ატ%  $Tm$  და 49,8 ატ%  $S$ ,  $TmSe$ -ის ფირები - 50,1 ატ%  $Tm$  და 49,9 ატ%  $S$ ,  $La_5Bi_3$ -ის ფირები - 62,4 ატ%  $La$  და 37,6 ატ%  $Bi$ ,  $La_4Bi_3$ -ის ფირები - 57,1 ატ%  $La$  და 42,9 ატ%  $Bi$ ,  $LaBi$ -ის ფირები - 50,0 ატ%  $La$  და 50 ატ%  $Bi$ ,  $LaBi_2$ -ის ფირები - 33,2 ატ%  $La$  და 66.8 ატ%  $Bi$ .

4) შესწავლილია  $Tm_2S_3$ ,  $TmS$  და  $LaBi$ -ის ფირების ზედაპირზე შემადგენელი კომპონენტების -  $Tm$ ,  $S$ ,  $La$  და  $Bi$ -ის განაწილება რენტგენის მეორად სხივებში. ნაჩვენებია, რომ ელემენტები განაწილებულია საკმაოდ თანაბრად.

5) მეორადი ელექტრონებით სკანირებადი მიკროსკოპით გადაღებული  $TmS$ -ის ფირის ზედაპირული სურათის სტატისტიკურმა დამუშავებამ აჩვენა, რომ ფირის მახასიათებელი ნაწილაკების ზომები მერყეობს 18 ნმ-დან 57 ნმ-მდე, ამასთან მახასიათებელი ნაწილაკების ~70%-ის ზომები შეადგენს 32 ნმ-ს.

ნაჩვენებია, რომ სხვა მუდმივი ტექნოლოგიური პარამეტრების შემთხვევაში  $TmS$ -ის ფირების მახასიათებელი ნაწილაკების ზომები დამოკიდებულია ფუძემრის ტემპერატურაზე. კერძოდ, ფუძემრის

ტემპერატურის გაზრდით ის იზრდება. ნაჩვენებია, რომ მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების გაზრდით ფირის მესრის მუდმივა იზრდება.

6) 95-500K ტემპერატურულ ინტერვალში შესწავლილია  $Tm_2S_3$  -ის სილიციუმის ატომებით ლეგირებული ფირების კუთრი წინაღობისა და თერმო ემმ-ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. კუთრი წინაღობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდიდან დადგენილია, რომ სილიციუმის მინარევის იონიზაციის ენერგია შეადგენს 0.32 ევ. 95 და 300 K ტემპერატურებზე, ფოტონების ენერგიათა უბანში 0 – 3.5 ევ შესწავლილია ფოტოგამტარებლობისა და ფოტო ემმ-ს სპექტრალური დამოკიდებულება.

ნაჩვენებია, რომ სილიციუმით ლეგირებული  $Tm_2S_3$  -ის ფირების ელექტროფიზიკური პარამეტრები ხასიათდებიან მაღალი მდგრადობით გახურება-გაცივების ციკლის მიმართ 95-500K ტემპერატურულ ინტერვალში. კერძოდ, 185-მდე გახურება-გაცივების ციკლი გავლენას არ ახდენს ელექტროფიზიკურ პარამეტრების სიდიდეზე და მათი ტემპერატურაზე დამოკიდებულების ხასიათზე.

7) ოთახის ტემპერატურაზე შესწავლილია  $TmS$ -ის ფირების წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტისა და მუხტის მატარებლების - ელექტრონების კონცენტრაციის დამოკიდებულება ფირის მახასიათებელი ნაწილაკების ზომებზე. ნაჩვენებია, რომ მახასიათებელი ნაწილაკების ზომების გაზრდით წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი იზრდება, ხოლო მუხტის მატარებლების კონცენტრაცია მცირდება.

8) ოთახის ტემპერატურაზე შესწავლილია 50-500 ნმ სისქის  $TmSe$ -ის ფირების კუთრი ელექტროგამტარობისა და მუხტის მატარებლების - ელექტრონების ძვრადობის დამოკიდებულება ფირის სისქეზე. ნაჩვენებია, რომ ფირის სისქის ზრდისას 200 ნმ-მდე კუთრი ელექტროგამტარობა და მუხტის მატარებლების ძვრადობა იზრდება, ხოლო შემდეგ 500 ნმ-მდე მუდმივი რჩება. ახსნილია ასეთი დამოკიდებულების მექანიზმი.

ოთახის ტემპერატურაზე ფოტონების ენერგიათა 0,5-4 ევ უბანში შესწავლილია  $TmSe$ -ის ფირების შთანთქმის სპექტრი. ნაჩვენებია, რომ ის

შეიცავს ოთხ ზოლს ენერგიების მაქსიმუმებით 1,1 ევ, 1,9 ევ, 2,9 ევ და 3,4 ევ. ჩატარებულია მიღებული შედეგების ანალიზი.

9) 95-500K ტემპერატურულ ინტერვალში შესწავლილია  $\text{La}_5\text{Bi}_3$ ,  $\text{La}_4\text{Bi}_3$ ,  $\text{LaBi}$  და  $\text{LaBi}_2$ -ის ფირების კუთრი ელექტროწინალობისა და თერმო ემმ-ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. ნაჩვენებია, რომ ყველა ფირის კუთრი წინალობა ტემპერატურის გაზრდით იზრდება. ამასთან, ტემპერატურის გაზრდით  $\text{La}_5\text{Bi}_3$  და  $\text{LaBi}_2$ -ის ფირების თერმო ემმ იზრდება, ხოლო  $\text{La}_4\text{Bi}_3$  და  $\text{LaBi}$ -ის ფირების - მცირდება.

ოთახის ტემპერატურაზე გაზომილია  $\text{La}_5\text{Bi}_3$ ,  $\text{La}_4\text{Bi}_3$ ,  $\text{LaBi}$  და  $\text{LaBi}_2$ -ის ფირების ჰოლის მუდმივა. ერთზონიანი მიახლოებით გათვლილია ელექტრონების კონცენტრაცია და ძვრადობა. ნაჩვენებია, რომ ყველა მომზადებული ფირი თავიანთი ელექტროფიზიკური თვისებებით ახლოსაა ლითონთან.

10) სრული გახეხვის მეთოდით შესწავლილია სხვადასხვა ფუძემრეზე (მონოკრისტალური სილიციუმი, სიტალი, ლეიკოსაფირონი) დაფენილი  $\text{TmSe}$ ,  $\text{TmS}$  და  $\text{LaBi}$  ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე. ნაჩვენებია, რომ ერთსა და იმავე მასალის ერთსა და იმავე ფუძემრეზე დაფენილი ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე იზრდება მიმდევრობით:  $\text{TmSe} - \text{TmS} - \text{LaBi}$ . დადგენილია, რომ ერთი და იგივე მასალის ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე დამოკიდებულია ფუძემრის მასალაზე და იზრდება მიმდევრობით სილიციუმი - სიტალი - ლეიკოსაფირონი. ასევე სრული გახეხვის მეთოდით შესწავლილია კომპონენტების ორი დამოუკიდებელი წყაროდან და წინასწარ სინთეზირებული მასალის დისკრეტული ვაკუუმურ-თერმული აორთქლების მეთოდით მიღებული  $\text{TmSe}$ -ის ფირების ფარდობითი მექანიკური სიმტკიცე. ნაჩვენებია, რომ დისკრეტული აორთქლებით მიღებული ფირების მექანიკური სიმტკიცე ~40%-ით აღემატება ორი დამოუკიდებელი წყაროდან აორთქლებით მიღებული ფირების ფარდობით მექანიკურ სიმტკიცეს.



**დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ  
შრომებში:**

- 1) Teteloshvili M., Jabua Z., Gigineishvili A., Iluridze G., Minashvili T., Davitadze K. Production of thulium sesquisulfide thin films by discrete evaporation and their mechanical properties. Abstracts. International conference „Nanosensory systems and nanomaterials”. Tbilisi, Georgia, June 6-9, 2013, p.74.
- 2) Teteloshvili M.G., Jabua Z. U., Gigineishvili A. V., Iluridze G. N., Minashvili T. A., Davitadze K. D. Fabrication of thulium sesquisulfide films by discrete evaporation and their mechanical properties. GEN, №1 (ტ. 69), 2014, ს. 42-44.
- 3) Джабуа З. У., Тетеловили М. Г., Гигинеишвили А. В. Технология наноплёнок моносulfида Тулия. GEN, №2 (ტ. 70), 2014, ს. 88-89.
- 4) Jabua Z., Teteloshvili M., Gigineishvili A. Technology of Tulum monosulfide nanofilms. Abstracts. International Conference “Tbilisi-Spring-2014”. “Nuclear radiation nanosensors and nanosensory systems”. Tbilisi, Georgia, 6-9 March, 2014, p.92.
- 5) Jabua Z., Teteloshvili M., Gigineishvili A. Technology of Tulum monosulfide nanofilms. Abstracts. 3<sup>rd</sup> International Conference “Nanotechnologies”. October 20-24, 2014, Tbilisi, Georgia. Nano 2014. p. 51
- 6) ტეტელოშვილი მ., ჯაბუა ზ., გიგინეიშვილი ა. თულიუმის მონოსულფიდის თხელი ფირების ელექტროფიზიკური თვისებები. საქართველოს ეროვნული მეცნიერებათა აკადემიისა და საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო - რეფერირებული ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები”. 2014, №2, გვ. 61-64.
- 7) Джабуа З. У., Тетеловили М. Г., Гигинеишвили А. В. Легирование кремнием и фотоэлектрические свойства тонких плёнок полуторного sulfида Тулия. Физ. Инж. Пов. 2014, т. 12, № 2, с. 232-236.
- 8) Тетеловили М.Г., Джабуа З.У., Гигинеишвили А.В. Приготовление тонких плёнок TmSe и электрофизические свойства. GEN, №3 (ტ. 71), 2014, ს. 35-36.
- 9) Teteloshvili M. Technology of Tulum monosulfide nanofilms Students 83 international scientific conference. Tbilisi, 2015.

**Georgian Technical University**

**Mzia Teteloshvili**

**Preparation of some rear earth halcogenides and pnictides films and  
physical properties**

The Abstract

of the thesis presented for attainment of the

Doctoral academic degree

Tbilisi, Georgia

2015

The work was prepared and done In the Georgian Technical University  
Faculty of Informatics and Control Systems,  
Departament of Physics.

The Scientific Supervisor: Doctor of technical science,  
Professor Zaur Jabua

The Reviewers:

The defence will ocure in July \_\_\_\_\_, 2014, at  
In the Georgian Technical University at the session of Dissertacion Council.  
Address: 77, Kostava Str., Tbilisi 0175,Georgia, Builing \_\_\_\_\_ Aditorium \_\_\_\_\_

The Thesis is available at the library of the Georgian Technical University  
The abstract is available on the webpage of the Georgian Technical University

Scientific Secretary of the Council \_\_\_\_\_ Tinatin Kaishauri

## Abstract

Technology of preparation of some pnictides and sulfides films, investigation of optical and electrophysical properties

The paper deals with reception of thin films of some the rare-earth elements (REE) sulfides, antimonides and tellurides and study their optical, electrophysical and mechanical properties. The work consists of an introduction, four chapters and conclusions.

The first chapter provides a critical review of the scientific literature relating to our interest in phase diagram of condition, manufacturing technology, crystal structure, electrophysical and optical properties of REE sulfides, antimonides and tellurides volume and thin film objects. As it is seen in the review, the chalcogenides and antimonides of REE represent a substantial interest as from the scientific research, as from the practical application perspectives point of view. Preparation of high-quality samples of these materials of the stoichiometric composition is a quite difficult technological challenge, which is not yet completely surmounted up to day. That in turn affects on studying levels of their physical properties. Particularly scarce is or there is almost no data on the physical properties of thin films and technology. It is not yet studied as well the impact of technological parameters on their phase and chemical composition and on improvement of the crystal lattice. REE one and a half sulfides of stoichiometric composition have high resistivity greatly limiting their practical application, so it is actual selection of the appropriate doping elements and processing of doping technology. Virtually no data are available for the zone structure parameters of a whole range of REE antimonides and sulfides. Despite of the increased interest paid to the mechanical properties of the films of REE compositions, in the scientific literature there is almost no data concerning their mechanical properties.

The second chapter describes the measuring equipment and measurement methods acceptable for modern technology, control and the physical properties of films: in particular, the components from two independent sources and the device for reception of films by preliminary synthesized material by vacuum-thermal evaporation method. Requirements to substrate and their cleaning methods, control of the thickness of films, X-ray and electron diffraction research methods, chemical composition research methodology, research methodology for electrophysical properties, devices for examination of optical spectra, installations for studying the photoelectric properties.

The third chapter is conventionally divided into three sections: the first section briefly describes the vacuum - thermal spraying provisions of various processes and methods of making the films themselves. The second part deals with results of specific activities carried out to receive the films of given composition. Perfection of the phase and chemical compositions, crystalline structure and dependence of survey/investigation data on technological regimes are considered. The third part is devoted to the films doping issues. In presented work the reception of all films was carried out by the method of vacuum-thermal evaporation of components from two independent sources. In addition, thin films of one and a half sulfide of gadolinium were prepared by the method of discrete vacuum - thermal evaporation of preliminary synthesized volume crystals. Results of , electron diffraction and X-ray micro-probe investigations are presented. In the same section the doping elements and the rationale of selection of doping methods and doping regimes for the films of  $Gd_2S_5$  are given.

The fourth chapter is devoted to experimental results and their discussion. Particularly, the results of study of optical, electrophysical and mechanical properties of thin films of  $Gd_2S_5$ ,  $DySb$  and  $ErTe$  are presented. Based on the study of the results of optical properties of  $Gd_2S_5$  the width of the forbidden zone is estimated. It is shown that it is equal to  $\sim 2.85$  eV. It is stated as well that within the spectrum of  $DySb$  the deep minimum and increase of the long-wave reflection both are related to the plasma vibrations of charge carriers.  $ErTe$  absorption spectrum has a well-defined strong four stripes of absorption with the energy maximums at 1.2 eV, 2.0 eV, 2.8 eV and 3.5 eV. Their analysis has been completed.

In 95-700 K temperature range the temperature dependence of the resistivity and Hall's constant of  $DySb$  have been studied. It is shown that the films are of electronic conductivity. It is calculated the temperature dependence of the mobility and concentration of charge carriers. Based on it the conclusion is given that  $DySb$  is the semi- metal itself. In 100 - 500 K temperature interval the temperature dependence of resistivity, Hall's constant and thermoelectric power (TEP) of  $ErTe$  films is studied. The temperature dependence of the concentration and the mobility of charge carriers is calculated. It is shown that according to Hall's constant measurements the  $ErTe$  films are of n-type conductivity, while according to the TEP - of p-type. The mechanism of such difference is explained.

Spectral and temperature dependences of the photoconductivity of films of  $\gamma$ - $Gd_2S_3$  doped by the cadmium and the lead are studied. It is shown that the dominant role in the photosensitivity play the acceptor levels, created by their compensation in the cationic sub-lattices by insertion of cadmium and lead doping atoms there. For cadmium doped  $\gamma$  -  $Gd_2S_3$  films the long-time relaxation of

photoconductivity is investigated. Relaxation threshold value is estimated at 0,13-0,27 eV. The ionization energy of the acceptor level created by Gd vacancy is assessed as 0.88 eV. The conclusion is made that the  $Gd_2S_3$  films doped by the cadmium and the lead should be the perspective material for the creation of photosensitive structures.

By full rubbing method the relative mechanical stiffness of the films received by two varieties of the method of vacuum - thermal evaporation of  $Gd_2S_3$  is studied. It is shown that the relative mechanical stiffness of the films received by the method of discrete evaporation is about 1.5-times more than the relative mechanical stiffness received by evaporation of components from two independent sources. Also, by full rubbing method the relative mechanical stiffness of DySb and ErTe is investigated. It is shown that these films have almost the same relative mechanical stiffness. It is estimated that for all the studied thin films substrate materials (silica, glass-ceramic, leiko-sapphire ) apply the significant effect on the relative mechanical stiffness.

At the end of the work the basic conclusions of the thesis and the cited literature are presented.