

ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის  
სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა  
ფაკულტეტი



ზაზა ჩუბინიძე

**გარდამავალ მეტალ-ჰაფნიუმის ოქსიდზე მემრისტორის მიღება და  
კვლევა**

სამაგისტრო ნაშრომი შესრულებულია ელექტრული და  
ელექტრონული ინჟინერიის სამაგისტრო  
პროგრამით მაგისტრის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

მეცნიერ ხელმძღვანელი: ამირან ბიბილაშვილი  
ფიზ.-მათ.მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი  
ასოც. პროფ.

თბილისი 2017

## შ ი ნ ა ა რ ს ი

ანოტაცია . . . . .	3
შესავალი . . . . .	5
თავი 1. ლიტერატურული მიმოხილვა . . . . .	7
1.1. კრისტალის რენტგენოგრაფიული ანალიზი დიფრაქტომეტრის გამოყენებით . . . . .	7
1.2. დიელექტრიკების ელექტრული პარამეტრების კვლევა ვოლტ-ფარადული (C-V) მახასიათებლის მეთოდით . . . . .	9
1.3. გრაფიკული პროგრამირების მეთოდი LabVIEW . . . . .	14
1.3.1. მონაცემთა ნაკადი (Dataflow) პროგრამირება LabVIEW-ში . . . . .	14
1.3.2. მონაცემთა მიღება LabVIEW-ში . . . . .	15
1.4. მეტალთა ოქსიდების მიღება მაგნეტრონული გაფრქვევის მეთოდით . . . . .	16
1.5. მემრისტორი და მისი პარამეტრები . . . . .	17
თავი 2. ექსპერიმენტული შედეგები . . . . .	22
2.1. საკვლევი ნიმუშები და მათი ქიმიური დამუშავება . . . . .	22
2.2. ჰაფნიუმის ოქსიდების ფორმირება მაგნეტრონული გაფრქვევის მეთოდით . . . . .	22
2.3. რენტგენული დანადგარის კომპიუტერული მართვის შემუშავება . . . . .	23
2.4. ჰაფნიუმის ოქსიდების რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი . . . . .	29
2.5. C-V მახასიათებლის გამზომის კომპიუტერული მართვის შემუშავება . . . . .	30
2.6. ჰაფნიუმის ოქსიდებზე აგებული სტრუქტურების კვლევა C-V მახასიათებლის გამოყენებით . . . . .	33
2.7. მემრისტორის ფორმირება ჰაფნიუმის ოქსიდების აქტიური შრით . . . . .	34
2.8. მემრისტორის ვოლტ-ამპერული I-V მახასიათებლების გამზომის შემუშავება . . . . .	36
2.9. მემრისტორის კვლევა ვოლტ-ამპერული მახასიათებლით . . . . .	42
დასკვნა . . . . .	44
გამოყენებული ლიტერატურა . . . . .	45

## ა ნ ო ტ ა ც ი ა

ნაშრომში წარმოდგენილია ჰაფნიუმის ოქსიდის აქტიურ შრიანი მემრისტორის მიღებისა და კვლევისათვის საჭირო მოწყობილობების კომპიუტერული პროგრამების შემუშავება, პარამეტრების გაზომვებისა და შედეგების კომპიუტერიზაცია. კომპიუტერიზაციის მთავარი მიზანი იყო, მემრისტორში შემავალი ჰაფნიუმის ოქსიდების ფენების ელექტრო-ფიზიკური პარამეტრების შესწავლა, მემრისტორის მიღების ოპტიმალური ტექნოლოგიური პროცესების დადგენისათვის. გაზომვების და კონტროლის ავტომატიზაციისთვის, პროგრამირება განხორციელდა თანამედროვე Dataflow, კერძოდ LabVIEW-პროგრამირებით.

კვლევაში გადაწყვეტილია სხვადასხვა ძირითადი ამოცანები როგორცაა, მემრისტორის მისაღებად საჭირო სხვადასხვა აქტიური ფენების რენტგენო სტრუქტურული ანალიზისათვის სპექტრების ჩამწერის, ძაბვა-ტევადობის (C-V) მახასიათებლების გაზომვების, მემრისტორის ძაბვა-დენის ( I-V ) მახასიათებლების, კომპიუტერულად მართვადი მოწყობილობების და პროგრამების შექმნა. მაგნეტრონული გაფრქვევით ჟანგბადის და არგონის სხვადასხვა პარციალურ წნევებზე, მიღებულ იქნა ჰაფნიუმის ოქსიდები. ცალკეული ჰაფნიუმის ოქსიდური ფირებისთვის ჩატარდა რენტგენო-სტრუქტურული ანალიზი და გაიზომა ვოლტ-ფარადული (C-V) მახასიათებლები, რის საფუძველზეც შეიქმნა მემრისტორის სტრუქტურა და გაიზომა მისი ძაბვა-დენის ( I-V ) მახასიათებლები.

ჩატარებული გაზომვების შედეგად დადგინდა, რომ მიღებული მემრისტორი სრულად აკმაყოფილებს მის წინაშე წაყენებულ მოთხოვნებს.

## Annotation

Here is reviewed how we have worked out computer programs, measured parameters and computerized the results, which are needed for research in order to get the active layer memristor of hafnium oxide. The main reason of computerizing was to study electro-physical parameters of hafnium oxide of the memristor. In order to set optimal technological processes, programming was realized in the modern dataflow LabVIEW programming.

There are resolved various basic tasks, such as creating of X-ray diffraction (XRD) spectrum analyzer recorder for different active layers, measuring characteristics of capacity-voltage and current-voltage hardwares controlled programs in order to get the memristor. With the magnetron sputtering in the different partial pressures of oxygen and argon spheres, we have gotten hafnium oxides. For the separate parts of the hafnium oxide, there was carried out X-Ray structural analysis and measured volt-farad features, after that, there was created structure of the memristor and then memristor was measured its current-voltage characteristics .

There was summarized results after appropriate measurements, and we came to the conclusions, that the received memristor meets the demands completely.

## შესავალი

ნახევარგამტარული ხელსაწყოებისა და ინტეგრალური მიკროსქემების (იმს) ელემენტების საფუძველზე ოპტიმალური მახასიათებლების მქონე მოწყობილობებისა და სისტემების მისაღებად ძირითადად გამოიყენება ორი გზა: მიმდინარეობს არსებული ტექნოლოგიის და გამზომი მოწყობილობების სრულყოფა ზღვრული პარამეტრების მისაღებად, გაზომვის სიზუსტის ასამაღებლად და ხდება ახალი მასალების კვლევა და დამუშავება. კერძოდ, ახალი ტექნოლოგიების შემუშავება და ნანოზომების მქონე, განსაკუთრებული თვისებების სტრუქტურების ფორმირება, რომლებიც პრინციპულად შეუძლებელია მიღებულ იქნას ტრადიციულ მასალებზე.

თანამედროვე ეტაპზე მსოფლიოს მოწინავე ქვეყნებში ინტენსიურად მიმდინარეობს მიკროელექტრონიკიდან ნანოელექტრონიკაზე გადასვლის პროცესი. ნანოელექტრონიკა მეცნიერების და ტექნიკის სწრაფად მზარდი დარგია, რომელიც იკვლევს და ქმნის ნანოზომებიან სტრუქტურებს და ხელსაწყოებს. ასეთი ხელსაწყოებისთვის აუცილებელია პარამეტრების გაზომვები დიდი სიზუსტით და მაღალი მგრძობიარობით. მხედველობაში მისაღებია ის ფაქტიც, რომ გაზომვის პრობლემა დაკავშირებულია არა მხოლოდ ნანოზომასთან, არამედ მასალის ახალ ფიზიკურ თვისებასთან და მასთან დაკავშირებულ მიღებული შედეგების ანალიზთან. ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი პრობლემების შესწავლა სცილდება ერთი სადიპლომო ნაშრომის თემას, ამიტომ წინამდებარე ნაშრომის მიზანია:

- სქემის ახალი ელემენტის – მემრისტორის მიღება ჰაფნიუმის ოქსიდების აქტიური შრეებით და მისი პარამეტრების გამზომი დანადგარ-მოწყობილობების კომპიუტერული მართვა;
- რენტგენოდიფრაქტომეტრის დანადგარის მონაცემთა ჩამწერი მოწყობილობის და კომპიუტერული მართვისათვის პროგრამის შემუშავება;
- მეტალ–დიელექტრიკ–ნახევარგამტარ სტრუქტურების ვოლტ–ფარადული (C-V) მახასიათებლის გამზომი მოწყობილობის და კომპიუტერული პროგრამის შემუშავება;
- მემრისტორის ვოლტ–ამპერული (I-V) მახასიათებლის გამზომი მოწყობილობის და კომპიუტერული პროგრამის შემუშავება;

დანადგართა ავტომატიზაციისა და კომპიუტერიზაციისთვის გამოყენებულ იყო პროგრამა LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench), რომელიც

ძირითადად გამოიყენება მონაცემთა მიღების, ინსტრუმენტების კონტროლისა და ინდუსტრიული ავტომატიზაციისთვის სხვადასხვა პლატფორმაზე: Microsoft Windows, UNIX, Linux და Mac OS X).

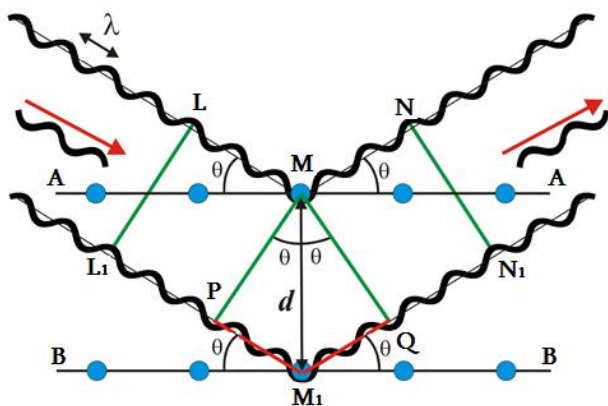
ზემოთ აღნიშნულ მოდიფიცირებულ დანადგარებზე გაზომილ იქნა ორიგინალური მემრისტორის და მისი აქტიური შრის პარამეტრები.

## თავი 1. ლიტერატურული მიმოხილვა

### 1.1. კრისტალის რენტგენოგრაფიული ანალიზი დიფრაქტომეტრის გამოყენებით

კრისტალურ სხეულებზე რენტგენის სხივთა მოქმედებისას, რომელთა ტალღის სიგრძე დაახლოებით ატომთა შორის მანძილის ტოლია  $\approx 2\text{\AA}$ , ხდება რენტგენის სხივთა დიფრაქცია. ამ დროს ხდება კრისტალურ მესერზე ე.წ. სელექტიური ანუ შერჩევითი არეკვლა. კრისტალზე რენტგენის სხივის დაცემისას სხივების ნაწილი შთანთქმება და ნაწილი გაიბნევა ატომებზე. ამ დროს ატომების თითოეული ელექტრონი შთანთქავს პირველადი რენტგენული გამოსხივების მცირე ენერგიას, მოდის რხევით მოძრაობაში და ასხივებს მიღებულ ენერგიას ყველა მიმართულებით. გამოსხივებული სხივები კოჰერენტულია, გარკვეული მიმართულებით, ატომების მიერ გამოსხივებული ენერგიები იკრიბება და მიიღება დიფრაქციულ სურათი, ე.ი. დიფრაქციული სურათი მიიღება იმ შემთხვევაში თუ გამოსხივებული სხივები იმყოფებიან ერთნაირ ფაზებში, ანუ როდესაც მოხდება ტალღების მაქსიმუმების (ან მინიმუმების) ზედდება. დავადგინოთ თუ რა პირობებში მიიღება დიფრაქციული სურათი.

განვიხილოთ კრისტალში პარალელური ატომური სიბრტყეები AA და BB (ნახ.1) დავუშვათ რომ, ამ სისტემაში მდებარე M და  $M_1$  ატომებს ეცემა მონოქრომატული პირველადი რენტგენული სხივების კონა LM და  $L_1M_1$  მიმართულებებით.



ნახ.1. ბრეგის კანონით რენტგენული დიფრაქცია

არეკვლის კანონების საფუძველზე [1], დაცემის და არეკვლის კუთხეები ტოლია  $\Theta = \Theta$ . AA და BB პარალელურ სიბრტყეთა შორის მანძილი აღვნიშნოთ d-თი. M წერტილიდან  $L_1M_1$  და  $M_1N_1$  სხივზე დავუშვათ პერპენდიკულარები, რომლებიც  $L_1M_1$  და  $M_1N_1$  სხივებზე მოჭრიან  $PM_1$  და  $M_1Q$  ტოლ მონაკვეთებს. როგორც ნახაზიდან ჩანს,

სვლათა სხვაობა  $L_1M_1N_1$  და  $LMN$  სხივებს შორის არის  $PM_1Q$ . თანახმად, იმისა, რომ  $\Delta PPM_1 = \Delta MM_1Q$ , ანუ  $PM_1 = M_1Q$ , სხივების სვლათა სხვაობა შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$L_1M_1N_1 - LMN = 2PM_1 \quad (1)$$

$\Delta QMM_1$  და  $\Delta PPM_1$  მართკუთხა სამკუთხედებია, ამიტომ ისინი მსგავსია და  $M$  წვეროსთან მდებარე კუთხეები ტოლია.  $\Delta PPM_1$  -დან

$$PM_1 = d \sin \Theta \quad (2)$$

თუ გავითვალისწინებთ (2) ფორმულას, მივიღებთ

$$L_1M_1N_1 - LMN = 2d \sin \Theta \quad (3)$$

არეკვლილ სხივთა შორის ინტერფერენციის მაქსიმუმებისთვის უნდა დაკმაყოფილდეს პირობა:

$$L_1M_1N_1 - LMN = n\lambda \quad (4)$$

სადაც,  $\lambda$  --რენტგენული გამოსხივების ტალღის სიგრძეა, ხოლო  $n$ -კი გვიჩვენებს ტალღის სიგრძეების ჯერადობას  $LM$  და  $L_1M_1$  სხივებისთვის არსებულ სვლათა სხვაობაში და ეწოდება არეკვლის რიგი ( $n=1,2,3,\dots$ ).

თუ გავაერთიანებთ (3) და (4) ფორმულებს მივიღებთ რომ,

$$n\lambda = 2d \sin \Theta \quad (5)$$

(5) ფორმულა ცნობილია ბრეგის კანონის სახელწოდებით, რომლის აზრიც მდგომარეობს შემდეგში: თუ პარალელურ ატომურ სიბრტყეებს, რომელთა შორის მანძილი არის  $d$ , რაღაც  $\Theta$  კუთხით ეცემა  $\lambda$ -ს ტოლი ტალღის სიგრძის გამოსხივება, დიფრაგირებული სხივი (გაძლიერებული) მიიღება მხოლოდ და მხოლოდ იმ შემთხვევაში თუ დაცემული და არეკვლილი სხივები ერთმანეთს ფაზებით ემთხვევიან, ან  $\lambda$ -ს ჯერად მთელ რიცხვს ( $2\lambda, 3\lambda \dots$  და ა.შ.) წარმოადგენენ.

ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგად დგინდება შესასწავლი ნივთიერებისათვის დიფრაქციის კუთხე, ბრეგის ფორმულის საშუალებით, თუ ცნობილი პირველადი გამოსხივების ტალღის სიგრძე  $\lambda$  და გვექნება შესასწავლი ნივთიერების პარალელური ატომურ სიბრტყეთა შორის მანძილი  $d$ . შემდგომ ეტაპზე სპეციალური ცხრილების საშუალებით ვეძებთ  $d$ -ს მნიშვნელობას და ვადგენთ ნივთიერების გვარობას.

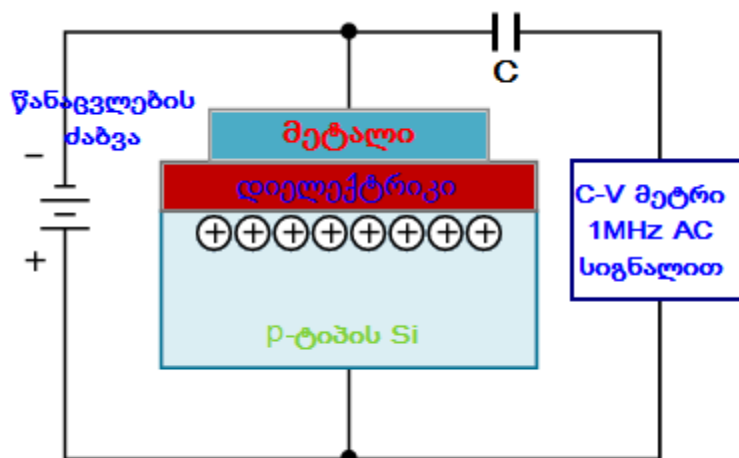


## 1.2. დიელექტრიკების ელექტრული პარამეტრების კვლევა ვოლტ-ფარადული (C-V)

### მახასიათებლის მეთოდით

ვოლტ-ფარადული (CV) გაზომვის მეთოდი ფართოდ გამოიყენება დიელექტრიკული მასალებისა და მათზე აგებული ხელსაწყოების მახასიათებელი პარამეტრების გასაზომად. ეს მეთოდი მარტივია, არ მოითხოვს მკაცრ ომურ კონტაქტებს და იძლევა დიდ ინფორმაციას მდნ-სტრუქტურის შესახებ. ამ მეთოდის ძირითადი პრინციპია: მეტალ-დიელექტრიკ-ნახევარგამტარზე (მდნ), ან შოტკის გადასასვლელზე ცვლადი ძაბვის მოდებისას ტევადობის გაზომვა [2-4]. დამოკიდებულება მოდებულ ძაბვასა და გაზომილ ტევადობას შორის იძლევა ინფორმაციას ბევრი ფიზიკური პარამეტრის შესახებ.

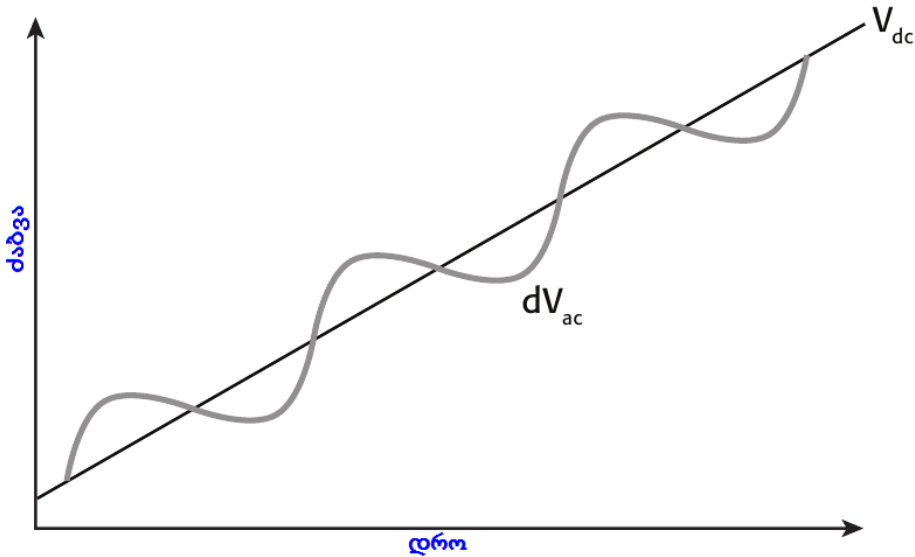
C-V გაზომვა იწარმოება ტევადობის მსგავს მდნ-სტრუქტურაზე რაც ჩვეულებრივ წარმოადგენს მეტალისა და ნახევარგამტარის შორის მოთავსებულ ოქსიდის ფენას. ოქსიდი ასრულებს დიელექტრიკის როლს, ხოლო ნახევარგამტარი და მეტალი კი ასრულებენ კონდენსატორის შემონაფენების როლს. ამასთან მეტალის ფართობი განსაზღვრავს შემონაფენის ფართობს. მდნ კონდენსატორი შეიძლება შეიქმნას პირდაპირ ნახევარგამტარულ საფენზე (n-ტიპის, ან p-ტიპის), რომელიც ამავდროულად ასრულებს ერთ-ერთი კონტაქტის როლს, ხოლო მეორე კონტაქტი არის მეტალური ფენა (ნახ.2). მდნ-სტრუქტურაზე მოდებული ძაბვის ნიშანი განისაზღვრება მეტალზე მოდებული ძაბვის ნიშნით. მდნ-სტრუქტურაზე მოდებული ძაბვის სიდიდის და ნიშნის მიხედვით დიელექტრიკ-ნახევარგამტარის საზღვარზე მიიღება ძირითადი მატარებლებით გამდიდრება, გაღარიბება ან ინვერსია. ნახ.2-ზე მოცემულია მდნ-სტრუქტურის ელექტრული ჩართვის სქემა.



ნახ.2. მდნ-სტრუქტურის ელექტრული ჩართვის სქემა.

C - კონდენსატორით გამოყოფილია ცვლადი და მუდმივი სიგნალი.

ტევადობის გაზომვისათვის მეტალზე მუდმივი (DC) ძაბვის გარდა უნდა მოედოს მცირე ამპლიტუდის მაღალი სიხშირის (AC) ძაბვაც, რომლებიც წაინაცვლებენ დროში (ნახ.3).



ნახ.3. მდნ-სტრუქტურაზე მოდებული მუდმივი (DC) და ცვლადი (AC) ძაბვები

მდნ-სტრუქტურის სრული ტევადობა წარმოადგენს ორი მიმდევრობით შეერთებული ტევადობების სისტემას. ერთი ტევადობა წარმოადგენს დიელექტრიკის ხვედრით ტევადობას, რომელიც დამოკიდებულია მხოლოდ მის დიელექტრიკულ მუდმივაზე და სისქეზე და არაა დამოკიდებული მოდებული ძაბვის არც პოლარობაზე და არც მის სიდიდეზე. მეორე ტევადობა წარმოადგენს ნახევარგამტარში სივრცული მუხტის უბნის ტევადობას, რომელიც იცვლება მოდებული ძაბვის პოლარობისა და სიდიდის მიხედვით. მათთან დაკავშირებული ეფექტური ტევადობა:

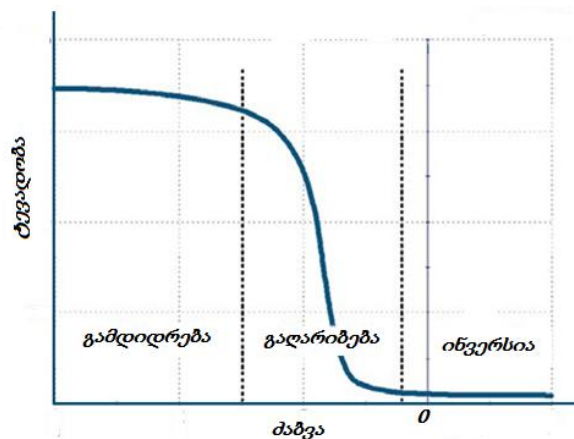
$$C = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

სადაც  $C_1$  - დიელექტრიკის, ხოლო  $C_2$  - ზედაპირის წინა არეში სივრცული მუხტის ტევადობებია [4].

განვიხილოთ მდნ-სტრუქტურის ვოლტ-ფარადული მახასიათებელი p-ტიპის ნახევარგამტარის შემთხვევაში. მეტალის ელექტროდზე უარყოფითი ძაბვის მოდებისას, ნახევარგამტარის ზედაპირის წინა არეში გროვება ხვრელები, ანუ ხდება გამდიდრება დენის ძირითადი მატარებლებით, შესაბამისად გამტარებლობა იქნება მეტი, ვიდრე

მოცულობაში. ამ დროს  $C_2 = \infty$  და (6) ფორმულიდან  $C = C_1$ . უარყოფითი ძაბვის ნულამდე შემცირებისა და დადებით ძაბვაზე გადასვლის შემდეგ ნახევარგამტარ-დიელექტრიკის გამოყოფ საზღვარზე დაგროვდება ელექტრონები, რითაც მიიღება გაღარიბება, შესაბამისად გამტარებლობა იქნება ნაკლები, ვიდრე მოცულობაში. ამ დროს ნახევარგამტარი დიელექტრიკისგან გამოყოფილია რაღაც შრით, ე.ი.  $C_2 \neq \infty$ , ის შემცირდა, ანუ თითქოს „გაიზარდა“ დიელექტრიკის სისქე. (6)-დან მიიღება, რომ  $C$  მცირდება (ნახ.4).

მოღებული სიგნალის სიხშირის მიხედვით არსებობს მაღალ ან დაბალსიხშირული C-V მახასიათებლები. სიხშირეზე, როდესაც არაძირითადი მატარებლები – ელექტრონები, სიგნალის ნახევარპერიოდში ვერ ასწრებენ სიგნალის აყოლას, დადებითი წანაცვლება ვერ გამოიწვევს ზედაპირისწინა უბანის ტევადობის შეცვლას. მოხდება სრული ეკრანირება და  $C$  მრუდის მინიმუმი გავა ნაჯერობაზე. ასეთია მაღალ სიხშირული მრუდი (ნახ.4). ხოლო, როდესაც არაძირითადი მატარებლები – ელექტრონები, სიგნალის ნახევარპერიოდში ასწრებენ სიგნალის აყოლას



ნახ.4. p-ტიპის ნახევარგამტარისთვის მდნ-სტრუქტურის C-V მახასიათებელი

მაშინ დადებითი წანაცვლების დროს (ინვერსიაში) მოხდება ელექტრონების დაგროვება და ტევადობაც იწყებს ზრდას. მუდმივი დადებითი ძაბვის ზრდით იზრდება გამდიდრების ხარისხი და C-V მახასიათებელზე მიიღება სიმეტრიული სურათი, რომლის მაქსიმალური მნიშვნელობა გაუტოლდება ოქსიდის ტევადობის მნიშვნელობას.

ნახ.4 გვიჩვენებს მაღალ სიხშირულ (1მგჰც) C-V მრუდს p-ტიპის ნახევარგამტარისთვის. როგორც სურათიდან ჩანს ამ მრუდზე გამოყოფილია სამი უბანი: აკუმულაციის, გაღარიბების და ინვერსიის.

n-ტიპის მდნ-სტრუქტურის ვოლტ-ფარადული მახასიათებელი ანალოგიურია იმ განსხვავებით, რომ 1) მუხტის ძირითადი მატარებლები არიან ელექტრონები; 2) C-V მრუდი არის p-ტიპის მრუდის სარკული ანარეკლი; 3) გამდიდრების უბანი მიიღება მეტალზე დადებითი ძაბვის მოდებით; 4) ინვერსიის უბანი კი მიიღება უარყოფით ძაბვის მოდებისას.

**C-V მახასიათებლიდან გამოითვლება:**

1) *ოქსიდის დიელექტრიკული მუდმივა*, თუ ცნობილია მისი სისქე. ოქსიდის ტევადობა (C) გამოითვლება მაღალსიხშირული C-V მრუდის ძლიერი გამდიდრების უბანში. ამ უბანში მდნ-სტრუქტურა, ბრტყელ-პარალელური კონდესატორის მსგავსია, ოქსიდის დიელექტრიკული მუდმივა ( $\epsilon$ ) შეიძლება დათვლილი იქნეს  $C_{ox}$  - დან და მეტალის კონტაქტის ფართობიდან შემდეგნაირად:

$$\epsilon = \frac{Cd_0}{A\epsilon_0} \cdot 10^7 \quad (7)$$

სადაც:  $d_0$  - ოქსიდის სისქე (ნმ);  $A$  - კონტაქტის ფართობი ( $cm^2$ );  $\epsilon_0$  - ვაკუუმის დიელექტრიკული შეღწევადობა (ფ/სმ);  $C$  - ოქსიდის ტევადობა (ფ) და  $10^7$  - პროპორციულობის კოეფიციენტი (სმ  $\rightarrow$  ნმ).

2) *ოქსიდის ეფექტური მუხტი ( $Q_{EFF}$ )* შეადგენს: ფიქსირებული მუხტის ( $Q_F$ ), ძვრადი იონების მუხტისა ( $Q_M$ ) და ოქსიდის ჩამჭერი ცენტრების მუხტების ( $Q_{OT}$ ) ჯამს:

$$Q_{EFF} = Q_F + Q_M + Q_{OT} \quad (8)$$

C-V მრუდით ოქსიდის მუხტის განსაზღვრა არ იძლევა ეფექტური მუხტში შემავალი კომპონენტების ცალ-ცალკე განსაზღვრის საშუალებას, რადგან ამისათვის საჭიროა გაზომვები მოხდეს სხვადასხვა ტემპერატურებზე. ასევე უცნობია ოქსიდში მუხტის განაწილების პროფილი, ამიტომ ანგარიშობენ  $Q_{EFF}$ -ის ფარდობით და არა აბსოლუტურ სიდიდეს. ამასთან უშვებენ, რომ მთელი მუხტი მოთავსებულია ერთ სიბრტყეში დიელექტრიკ-ნახევარგამტარის გამყოფ საზღვართან.

$Q_{EFF}$  შეიძლება გამოითვალოს შემდეგნაირად:

$$V_{FB} - W_{MS} = -\frac{Q_{EFF}}{C_{fb}} \quad (9)$$

სადაც,  $V_{FB}$  - სწორზონოვანი ძაბვა;  $W_{MS}$  - მეტალ-ნახევარგამტარის გამოსვლის პოტენციალი (ვ), ალუმინისა და p-ტიპის სილიციუმის ( $N_{BULK} = 10^{16} cm^{-3}$ ) შემთხვევაში  $W_{MS} = -0.95$ ვ, ხოლო n-ტიპისათვის  $W_{MS} = -0.27$ ვ;  $Q_{EFF}$  - ოქსიდის ეფექტური მუხტი ( $კ/სმ^2$ ) და  $C_{fb}$  - ოქსიდის ფარდობითი ტევადობა (ფ/სმ<sup>2</sup>);  $C_{fb}$  არის ტევადობა ფართის ერთეულზე, ამიტომ

$$Q_{EFF} = \frac{C_{FB}(W_{MS} - V_{FB})}{A} \quad (10)$$

სადაც,  $A$  არის კონტაქტის ფართობი ( $\text{სმ}^2$ ),  $Q_{EFF}$  - ეფექტური მუხტის ფარდობითი სიდიდე ( $\text{კ/სმ}^2$ ),  $C_{FB}$  სწორზონოვანი ტევადობა (ფ),  $W_{MS}$  მეტალსა და ნახევარგამტარს შორის გამოსვლის პოტენციალი (ვ).

ოქსიდის ეფექტური მუხტის კონცენტრაცია კი გამოითვლება, როგორც

$$N_{EFF} = \frac{Q_{EFF}}{q} \quad (11)$$

სადაც,  $N_{EFF}$  - ოქსიდის ეფექტური მუხტის კონცენტრაცია ( $\text{სმ}^{-2}$ );  $Q_{EFF}$  - ოქსიდის ეფექტური მუხტი (ვ) და  $q$  - ელექტრონის მუხტი ( $1,60219 \times 10^{-19}$  ვ).

3) ტევადობის ( $C_{FB}$ ) განსაზღვრა სწორი ზონებში. ამ დროს ზედაპირის პოტენციალი ნულის ტოლია. ეს ტევადობა გამოწვეულია იმით, რომ გამდიდრების უბანში, ძაბვის ნულთან ახლოობაში, ზედაპირის წინა უბანში დენის მატარებელთა ძვრადობის სიმცირის გამო, გამტარებლობა ნაკლებია მოცულობითი გამტარებლობასთან შედარებით. ეს იწვევს C-V მრუდის უფრო ადრე დახრას, ვიდრე ძაბვა ნულს გაუტოლდება და მისი ნულთან გატოლებისას, ანუ სწორი ზონებისას, ტევადობა იქნება ნაკლები, ვიდრე ოქსიდის ტევადობა. მის გამოსათვლელად გამოვიყენოთ სწორზონოვანი ტევადობის მეთოდი. ამ მეთოდის თანახმად, სწორზონოვანი ტევადობის ( $C_{FB}$ ) სიდიდე დაითვლება ოქსიდის ტევადობისა და დეზაის სიგრძიდან. დეზაის სიგრძის იდეა ნასესხებია პლაზმური ფიზიკიდან და განსაზღვრავს იმ სიგრძეს, რომელსაც ელექტრონი პლაზმაში გადის დაუჯახებლად. ამ მოსაზრებიდან გამომდინარე ნახევარგამტარზე ჩათვლილია პლაზმად.

$C_{FB}$  გამოითვლება შემდეგი ფორმულიდან:

$$C_{FB} = \frac{C_{ox}(\epsilon_s A / \lambda) \cdot (10^2)}{C_{ox} + (\epsilon_s A / \lambda) \cdot (10^2)} \quad (12)$$

სადაც:  $C_{FB}$  - სწორზონოვანი ტევადობა (ფ);  $C_{ox}$  - ოქსიდის ტევადობა (ფ);

$A$  - კონტაქტის ფართობი ( $\text{სმ}^2$ );  $\epsilon_s$  - ნახევარგამტარის დიელექტრიკული შეღწევადობა (ფ/სმ);  $10^2$  - პროპორციულობის კოეფიციენტი ( $\text{სმ} \rightarrow \text{ნმ}$ ) და  $\lambda$  - დეზაის ტალღის სიგრძე, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\lambda = \left( \frac{\epsilon_s kT}{q^2 N} \right)^{1/2} \cdot (10^{-2}) \quad (13)$$

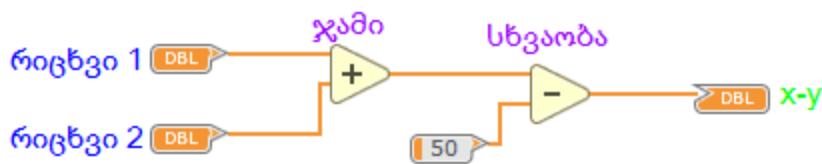
სადაც:  $\lambda$  - დეზაის ტალღის სიგრძე (მ);  $\epsilon_s$  - ნახევარგამტარის დიელექტრიკული შეღწევადობა (ფ/სმ);  $kT$  - სითბური ენერჯია ოთახის ტემპერატურაზე (293K) ( $4.046 \times 10^{-21}$  ჯ);  $q$  - ელექტრონის მუხტი ( $1,60219 \times 10^{-19}$  ვ);  $N$  - ხვრელების კონცენტრაცია ნახევარგამტარში (p-ტიპის შემთხვევაში) და  $10^{-2}$  პროპორციულობის კოეფიციენტი ( $\text{სმ} \rightarrow \text{მ}$ ).

### 1.3. გრაფიკული პროგრამირების მეთოდი LabVIEW

კომპანია National Instruments-ის პროგრამული პაკეტი LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) წარმოადგენს თანამედროვე მაღალი დონის დაპროგრამების ენის პლატფორმას, რომელსაც ეწოდება “G” ვიზუალური გრაფიკული “Dataflow”, “მონაცემთა ნაკადით” პროგრამირება [5], რომელიც ტესტირების, გაზომვის და ინდუსტრიული ავტომატიზაციის საშუალებას იძლევა. იგი შეიქმნა 1980-იან წლების დასაწყისში და ძირითადად გამოიყენება მონაცემთა მიღების, ინსტრუმენტების კონტროლისა და ინდუსტრიული ავტომატიზაციისათვის სხვადასხვა პლატფორმაზე : Microsoft Windows, UNIX, Linux და Mac OS X. LabVIEW შექმნილია მეცნიერების და ინჟინრებისთვის, რადგან მისი პროგრამირების სინტაქსის გაგება მარტივია და არ მოითხოვს რთულ სინტაქსურ პროგრამირებას.

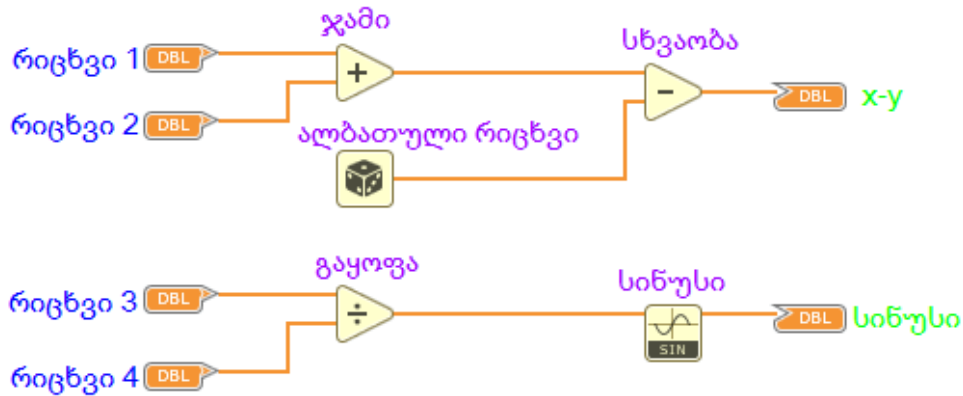
#### 1.3.1 მონაცემთა ნაკადი (Dataflow) პროგრამირება LabVIEW-ში

G მონაცემთა ნაკადის Dataflow პროგრამირება წარმოადგენს გრაფიკულ პროგრამირების ენას, რომელშიც სქემაზე გამოსახულ კვანძებში მოქმედებები სრულდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც მონაცემი ხელმისაწვდომია მავთულის გავლით ყველა საჭირო შესასვლელზე. როდესაც კვანძი დაასრულებს მოქმედებას ის გადასცემს მონაცემს მავთულის გასწვრივ შემდეგ კვანძში მონაცემების ნაკადის გზით. მავთულის გასწვრივ მონაცემის მოძრაობას და კვანძების გავლას ეწოდება მონაცემთა ნაკადი Dataflow და განსაზღვრავს კვანძების შესრულების თანმიმდევრობას [5;6].



ნახ.5 G სქემაზე ოპერაციათა თანმიმდევრობა

რადგან კვანძი სრულდება მაშინ, როდესაც იღებს ყველა შესასვლელს (რიცხვი1, რიცხვი2), შედეგად ნახ.5. G სქემაზე გამოსახული სხვაობა მანამ არ შესრულდება, სანამ ჯამი არ დასრულდება და არ გადასცემს მონაცემს სხვაობას, თუმცა შემდეგ G სქემაზე ნახ.6. ჯამი, ალბათური რიცხვი და გაყოფის კვანძები, ყველა ერთმანეთზე არაა დამოკიდებული, ამიტომაც შეიძლება ეს დამოუკიდებელი კვანძები ნებისმიერად შესრულდეს, რომელსაც ჩვენ ვერ განვსაზღვრავთ, LabVIEW თვითონ განსაზღვრავს რომელი შეასრულოს პირველი.

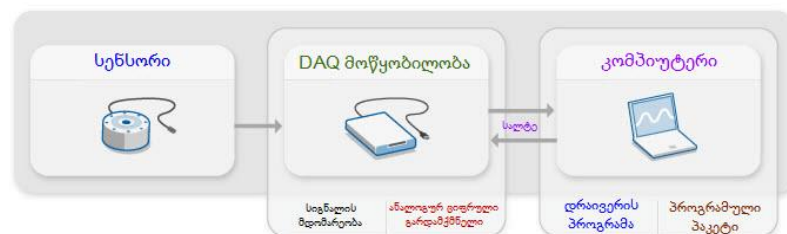


ნახ.6. განცალკეული G პროგრამა, რომელიც სრულდება ერთმანეთის დამოუკიდებლად

რადგან ნაცვლად თანმიმდევრული ბრძანებებისა, მონაცემთა ნაკადით G პროგრამირებაში შეიძლება შეიქმნას სქემა, რომელსაც ექნება ერთდროული ოპერაციების შესრულების უნარი, ნახ.6 მიუთითებს ოპერაციების ერთდროულ განხორციელებას.

### 1.3.2 მონაცემთა მიღება LabVIEW-ში

მონაცემთა მიმღები (DAQ) (Data Acquisition) არის კომპიუტერის მეშვეობით გაზომვის პროცესი ელექტრული ან ფიზიკური მოვლენის, როგორებიცაა ძაბვა, დენი, ტემპერატურა, წნევა, ბერა და ა.შ. მონაცემთა მიმღები (DAQ) სისტემა შედგება სენსორების, DAQ გამზომი აპარატის და კომპიუტერული პროგრამის პაკეტისაგან [7-10]. ტრადიციული გაზომვითი სისტემებთან შედარებით PC-DAQ მონაცემთა მიმღებები არიან უფრო პროდუქტიულები, ენერგოეფექტურები, აქვთ სტანდარტული კომპიუტერული მხარდაჭერა, გამოირჩევიან მოქნილობითა და რენტაბელურობით გაზომვითი პრობლემების გადაჭრისას.



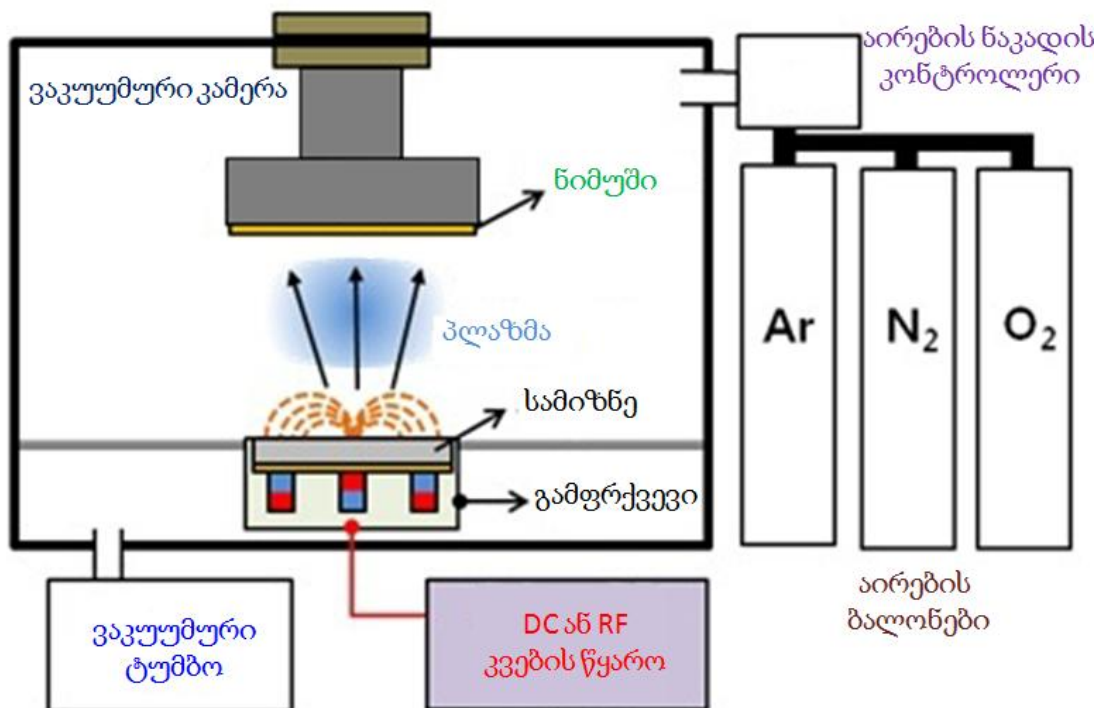
ნახ.7 DAQ -ის ზოგადი შეერთება კომპიუტერთან

(DAQ) მონაცემთა მიმღები მოწყობილობა წარმოადგენს ინტერფეისს კომპიუტერსა და გარე სამყაროს სიგნალს შორის ნახ.7, მისი მთავარი ფუნქციაა შემოსული ანალოგური

სიგნალის დისკრეტიზაცია, რათა კომპიუტერმა შეძლოს მათი ინტერპრეტაცია. სიგნალის გასაზომად DAQ-ის სამი ძირითადი კომპონენტია: სიგნალის მდგომარეობის სქემა, ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (ADC) და კომპიუტერის სალტე. ბევრი DAQ მოწყობილობა ავტომატიზირებული გაზომვების სისტემების და პროცესებისათვის შეიცავს სხვა ფუნქციებსაც, როგორებიცაა ციფრულ-ანალოგური გარდამქმნელი (DAC), ციფრული შეტანა გამოტანის (I/O) ხაზები და მთვლელები/ტაიმერები.

#### 1.4. მეტალთა ოქსიდების მიღება მაგნეტრონული გაფრქვევის მეთოდით

მეტალთა ოქსიდების მაგნეტრონული გაფრქვევა წარმოადგენს თხელი ფირების მიღების თანამედროვე მეთოდს [11], რომელშიც პლაზმის მისაღებად გამოყენებულია მაგნიტური სისტემა, მაღალი ძაბვა და სხვადასხვა აირები. პლაზმაში იონებს ენიჭება დიდი ენერგიები და ეჯახებიან გასაფრქვევი მასალის სამიზნეს, რის შედეგადაც გაფრქვეული მასალა ეფინება ნიმუშზე და მიიღება თხელი ფენები. იმისდა მიხედვით თუ რა მასალა გვინდა, გამოიყენება Hf, Fe, Ti, Al სამიზნეები და სპეციალური ზესუფთა აირები Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> და ა.შ (ნახ.8).

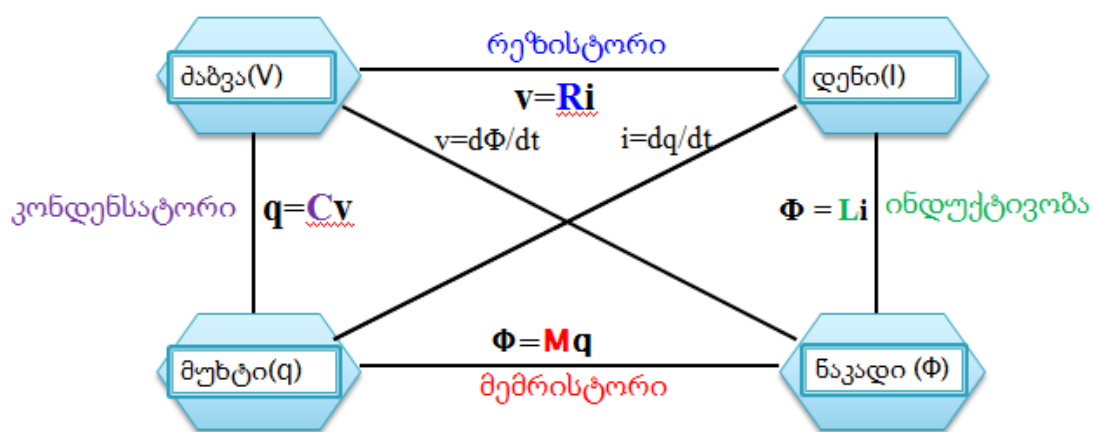


ნახ.8 მაგნეტრონული გაფრქვევის სისტემა



### 1.5. მემრისტორი და მისი პარამეტრები

მემრისტორის არსებობა პირველად თეორიულად იწინასწარმწეველა გასული საუკუნის 70-იან წლებში ამერიკელმა, ბერკლის უნივერსიტეტის მკვლევარმა ლეონ ჩუამ [12], მისი აზრით უნდა არსებობდეს ელექტრო სქემის მეოთხე ბაზური ელემენტი, რეზისტორის, ტევადობის და ინდუქტიობის გარდა, რომელიც აღწერდა კავშირს მაგნიტურ ნაკადსა და მუხტს შორის (ნახ.9) ასეთი ელემენტი არ შეიძლება შემდგარიყო ამ სამი პასიურ ელემენტთა რაიმე კომბინაციით და ამ ელემენტს უწოდა *მემრისტორი*, ანუ „დამამახსოვრებელი“ რეზისტორი (memory resistor).



ნახ.9 . ელექტრული სქემის ბაზური ელემენტები და კავშირი მათ შორის.

ის გამოდიოდა იმ მოსაზრებიდან, რომ ელექტრობაში ოთხი ძირითადი სიდიდეა: მუხტი ( $Q$ ), დენი ( დენის ძალა  $I$  ), ძაბვა ( პოტენციალთა სხვაობა  $U$  ) და მაგნიტური ნაკადი ( $\Phi$ ). ყველა ეს სიდიდეები წყვილ-წყვილად უკავშირდებიან ერთმანეთს: რეზისტორი – აკავშირებს დენის ძალას და ძაბვას, კონდენსატორი – ძაბვას და მუხტს, ინდუქტივობა – მაგნიტურ ნაკადს და დენის ძალას.

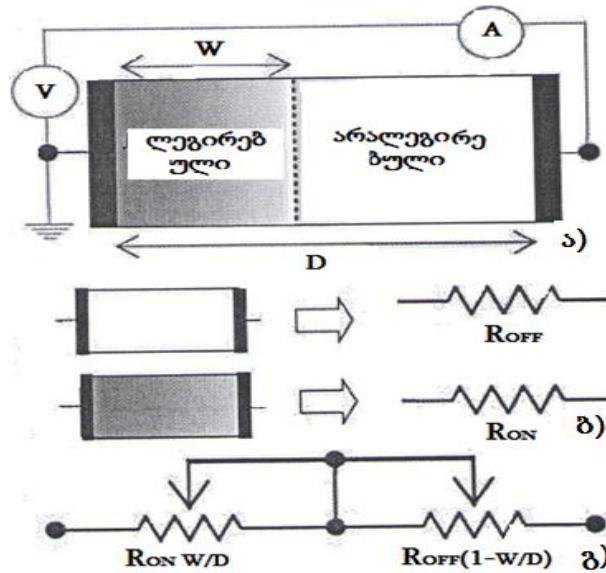
მემრისტორის წინააღმდეგობა დამოკიდებულია მასში გამავალ მუხტის სიდიდეზე [13], ანუ მასში გამავალ დენის ხანგრძლიობაზე. მისი მახასიათებელია  $M$  მემრისტორობა, როგორც (რეზისტორისთვის  $R$  წინააღმდეგობა), რომლის სიდიდეა მაგნიტური ნაკადის ცვლილების ფარდობა მუხტის ცვლილებასთან. ჩუას აზრით აკლია კავშირი მაგნიტურ ნაკადსა და მუხტს შორის. ამიტომ შემოიღო  $d\Phi = MdQ$  (ნახ.9.). მაშინ ცხადია გამოვა, რომ:

$$V = M(Q)I \quad (14)$$

თუ  $M=Const$ , მაშინ (14) ომის კანონია წრედის უბნისთვის და ზოგადად  $M \neq Const$ , ანუ მემრისტორობა დამოკიდებულია მისი მდგომარეობის წინაისტორიაზე, თუ მასში რა რაოდენობის მუხტი გადიოდა.

მემრისტორის თვისება შეიძლება განხილულ იქნას შემდეგი მოდელით. დავუშვათ, რომ მისი სრული წინაღობა შედგება ორი ცვლადი რეზისტორის წინააღობათა მიმდევრობით შეერთებისგან (ნახ.10). ერთ-ერთი რეზისტორი (TiO-ით) დაბალი წინააღობითაა, ანუ დიაა ( $R_R=R_1$ ), ხოლო მეორე – დიდი წინააღობით ჩაკეტილია (TiO<sub>2</sub>-ით), ანუ ( $R_C=R_2$ ).

TiO<sub>2</sub>-ის მხრიდან ელექტროდზე დადებითი ძაბვის მოდებისას იცვლება მისი კრისტალური სტრუქტურა. ჟანგბადის დადებითი იონები მიემართებიან TiO-ში, მოხდება წინააღობათა გადანაწილება TiO<sub>2</sub>-TiO-ს შორის და მათ შორის ვირტუალური საზღვარი



ნახ.10. მემრისტორის მუშაობის მოდელი

გადაიწევს, რომლის სიჩქარე და სიდიდე დამოკიდებულია მუხტის გავლის ხანგრძლიობაზე. ამ დროს ძაბვასა და დენს შორის თანაფარდობა ასე გამოისახება:

$$V(t) = \left[ R_{on} \frac{W}{D} + R_{off} \left( 1 - \frac{W}{D} \right) \right] I(t) \quad (15)$$

სადაც,  $W$  -დიდი გამტარებლობის ფენის სისქეა,  $D$  -ელექტროდებს შორის მანძილი, ანუ ორივე სისქეთა ფენების ჯამი. ამ დროს დიდი გამტარებლობის მხრიდან საზღვარი წაინაცვლებს კანონით:

$$\frac{dW(t)}{dt} = \mu \frac{R_{on}}{D} I(t) \quad (16)$$

სადაც,  $\mu$  – იონების ძვრადობაა. (17)–ის ინტეგრებით მიიღება:

$$W(t) = \mu \frac{R_{on}}{D} Q(t) \quad (17)$$

(17) ფორმულის ჩასმით (14) ფორმულაში, (15)–ის გათვალისწინებით და, რომ  $R_1 \ll R_2$ , მიიღება:

$$M(Q) = R_{off} \left( 1 - \frac{\mu R_{on}}{D^2} \right) Q(t) \quad (18)$$

(18) ფორმულიდან ჩანს: 1) მემრისტორობა დამოკიდებულია მუხტზე, ანუ მასში გამავალი სრული მუხტის ფუნქციაა; 2) მემრისტორობა მკვეთრად იზრდება ნანოფენების სისქეების შემცირებით; 3) მემრისტორობა დამოკიდებულია, ერთი და იგივე სისქეების შემთხვევაში, გარდამავალი მეტალის ოქსიდების გვარობაზე ( $R_1; R_2$ ); 4) მემრისტორობა დამოკიდებულია იონების ძვრადობაზე.

შესაძლებელია მემრისტორმა შეცვალოს რეზისტორი:

$$M = \frac{d\varphi}{dq} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dt}{dq} = \frac{V}{I} = R \quad (19)$$

ან კონდენსატორი:

$$M = \frac{d\varphi}{dq} = \frac{dVdt}{CdV} \Rightarrow \frac{1}{C} \quad (20)$$

ან ინდუქტიობა:

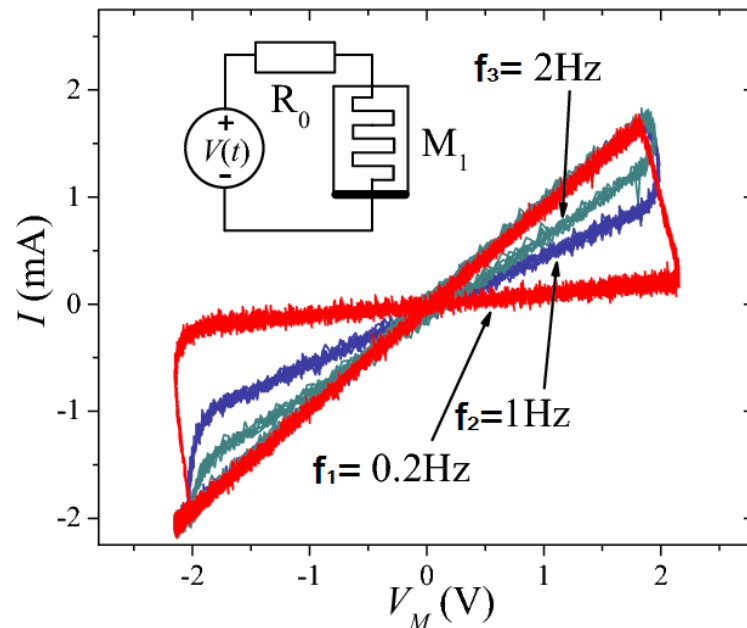
$$M = \frac{d\varphi}{dq} = \frac{LdI}{dIdt} \Rightarrow L \quad (21)$$

რაც კიდევ უფრო გაზრდის ინტეგრალური მიკროსქემის სწრაფქმედებას და ინტეგრაციის ხარისხს.

როდესაც მემრისტორზე მოდებულია განსაზღვრული სიხშირის სინუსოიდალური ცვლადი ძაბვა, მისი ვოლტ–ამპერული მახასიათებელი ლისაჟუს ფიგურის მსგავსი სახისაა, ანუ მემრისტორს, რეზისტორისგან განსხვავებით, აქვს ჰისტერეზისი. ესეც მიუთითებს მის მახსოვრობის ეფექტზე. ნახ.11 – ზე გამოსახულია რეზისტორის დენის დამოკიდებულება ცვლადი ძაბვის სიხშირეზე, ზედა კუთხეში მოცემულია მემრისტორის სქემატური აღნიშვნა. ძაბვის სიხშირის გაზრდით ჰისტერეზისული მრუდი გადადის წრფივში.

გრაფიკიდან ჩანს, რომ ძაბვის სიხშირის გაზრდით მცირდება ჰისტერეზისის ეფექტი და ზღვარში მიიღება დახრილი წრფე–მემრისტორი გადავიდა ჩვეულებრივ

რეზისტორში. ეს ფიზიკურად გასაგებია, რადგან წინააღმდეგობის ცვლილება დამოკიდებულია გავლილ მუხტზე და სიხშირის გაზრდით, ერთ ნახევარპერიოდში გაივლის მუხტი და მეორეში ვეღარ მოასწრებს გავლას. რეზისტორის



ნახ.11. მემრისტორზე დენის დამოკიდებულება სხვადასხვა სიხშირის ცვლად მახვავზე.

წინააღმდეგობა განისაზღვრება დენის მახვავზე დამოკიდებულების გრაფიკის დახრილობიდან. ნახ.11–დან ჩანს, რომ დენის და მახვის ნულ მნიშვნელობაზე, დაბალი  $f_1$  სიხშირისას, იკვეთება ორი მრუდი – აღმავალი მცირე დახრით (დიდი წინააღმდეგობა) და დაღმავალი შედარებით დიდი დახრით (მცირე წინააღმდეგობა). ეს ნიშნავს, რომ უძრავობაში მემრისტორის წინააღმდეგობა სხვადასხვაა და დამოკიდებულია წინაისტორიაზე.

მემრისტორის მუშაობის მექანიზმიდან გამომდინარე მემრისტორობაში გადამწყვეტ როლს ასრულებს ჟანგბადის ვაკანსიის კონცენტრაცია, რომლის მართვის ერთ–ერთი მექანიზმია მემრისტორის დამზადების ეტაპზე, +4 დაჟანგვის ხარისხის მეტალის ოქსიდის ლეგირება +3 დაჟანგვის ხარისხის მეტალით.

მემრისტორის თვისებებიდან გამომდინარე, ის შეიძლება გამოყენებულ იქნას ბიპოლარულ გადამრთველად: საწინააღმდეგო პოლარობის მახვის მოდებისას მემრისტორი ჩართავს ან გამორთავს მასში გამავალი მუხტით წრედს. ციფრული ელექტრონიკის თვალსაზრისით, შეიძლება ითქვას, რომ მემრისტორი გადადის „0“ მდგომარეობიდან „1“ მდგომარეობაში, ან პირიქით. ამასთან, მემრისტორი ამ მდგომარეობას „იმახსოვრებს“ და შეუძლია შეინახოს პრაქტიკულად, ძალიან დიდი

დროის განმავლობაში, რისთვისაც ის არ საჭიროებს ძაბვის წყაროს. ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადართვის დრო შეადგენს ~1ნწმ-ს. შესაძლებელია რამდენიმე რიგით გაიზარდოს მახსოვრობის სიმკვრივე და შეფარდება წარმოება/ენერგომოხმარება. მემრისტორზე აგებულმა ჩიპებმა მიიღო სახელწოდება „ნანოშემნახავი“ (nanostores). თვლიან, რომ ის იქნება მომავალი კომპიუტერის საფუძველი და ძირითადი ელემენტი. შესაძლებელია ახლო მომავალში „მერმისტორული“ მახსოვრობა გახდეს რეკორდული – 30 გბაიტი/სმ<sup>2</sup> მახსოვრობის სიმკვრივით. ასეთი კომპიუტერები შეიძლება ჩაირთოს და გამოირთოს ნებისმიერ მომენტში, გადატვირთვის გარეშე. ექნებათ სრულიად სხვა მასალები – მცირე გაბარიტებით, დიდი სწრაფქმედებით, უმნიშვნელო მოხმარების ენერჯით, დიდი წარმადობით, ჩატვირთვის დროის გარეშე. მემრისტორის აქტიურ შრეებად გამოიყენებიან სხვადასხვა გარდამავალი მეტალების ოქსიდები, რომელთა შორის ერთერთ პერსპექტიულ ოქსიდად ითვლება ჰაფნიუმის ოქსიდები [14].

## თავი 2. ექსპერიმენტული შედეგები

### 2.1. საკვლევი ნიმუშები და მათი ქიმიური დამუშავება

დასახული ამოცანების გადაჭრისთვის ქვესაფენებად გამოყენებულ იყო სილიციუმისა (Si) და საფირონი ( $Al_2O_3$ ) ფირფიტები. სილიციუმის საფენები გამოყენებული იყო მდნ სტრუქტურის მისაღებად შემდგომ მათზე C-V მახასიათებლების შესასწავლად, ხოლო საფირონის საფენები გამოყენებული იყო რენტგენოსტრუქტურული ანალიზისათვის და მემრისტორის ფორმირებისათვის.

სილიციუმის ქვესაფენის მომზადება. ჰაფნიუმის ოქსიდების C-V მახასიათებლების შესწავლისთვის ქვესაფენად გამოყენებულ იყო: KDF-10 მარკის, 65 მმ დიამეტრის, 300მკმ სისქის, (100) ორიენტაციის p-ტიპის სილიციუმის ფირფიტები, ხარისხიანი ოქსიდური ფირების მიღებისთვის საჭიროა სილიციუმის ზედაპირის მაღალი სისუფთავე. ამიტომ ოქსიდური ფირების გაზრდამდე ჩატარებულ იქნა ზედაპირის ქიმიური დამუშავება ორ სტადიად:

I - სტადია - მოწამვლა 5 წუთის განმავლობაში  $H_2O_2:H_2SO_4=1500:350$  (მლ) ხსნარში, სამჯერადი გარეცხვა დეიონიზირებულ წყალში 5-5 წუთი;

II - სტადია - მოწამვლა 10 წუთის განმავლობაში  $H_2O_2:H_2O:NH_4OH=200:400:400$  (მლ) ხსნარში, სამჯერადი გარეცხვა დეიონიზირებულ წყალში 5-5 წუთი.

სილიციუმის ქვესაფენის ზედაპირის ასეთი ქიმიური დამუშავების შემდეგ ფირფიტები შრებოდნენ, 2000 ბრ/წთ მბრუნავ ცენტრიფუგაზე 3-3 წუთის განმავლობაში. შემდეგ ხდებოდა ზედაპირების ვიზუალური კონტროლი MBC-10 მიკროსკოპით.

საფირონის ქვესაფენის მომზადება. ჰაფნიუმის ოქსიდების, მემრისტორის მიღებისა და მისი შესწავლისთვის, ქვესაფენად გამოყენებულ იყო 6 სმ. დიამეტრის, 0,46 მკმ. სისქის, (0001) ორიენტაციის საფირონის ფირფიტები, ზედაპირის ქიმიური დამუშავება მოხდა: 1) აცეტონში განცხიმვით; 2) დუდილი ხსნარში  $NH_4OH+H_2O_2+H_2O(1:1:4)$ , 10წთ განმავლობაში; 3) გარეცხვა დეიონიზირებულ წყალში 5წთ; 4) დამუშავება იზოპროპილის სპირტში და 5) გამრობა იზოპროპილის ორთქლში.

### 2.2. ჰაფნიუმის ოქსიდების ფორმირება მაგნეტრონული გაფრქვევის

#### მეთოდით

ქიმიურად გასუფთავებული ქვესაფენი თავსდებოდა მოდერნიზირებულ ვაკუუმურ დანადგარში (YBH 2M – 2), სადაც მაღალი ვაკუუმი მიიღებოდა ტურბომოლეკულური

ტუმბოთი. ნარჩენი და შეშვებული გაზების პარციალური წნევები იზომებოდა მასპექტრომეტრით SRS RGA200. მაგნეტრონული გაფრქვევით ჰაფნიუმის ოქსიდების მიღების ტექნოლოგიური რეჟიმები მოცემულია ცხრ.1.

ნიმუშის დასახელება	საფენი	P (წნევა $\times 10^{-2}$ პა)	I დენი (მა)	T საფენის ტემპერატურა °C	P <sub>Ar</sub> (%)	P <sub>O2</sub> (%)	t დრო (წთ)	d სისქე (ნმ)
რენტგენული ანალიზისთვის HfO <sub>2</sub> ნიმუშები								
N1 HfO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.7-4.9	300	520-530	43	43	30	--
N2 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	65	10	30	1221
N3 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	56	20	30	236.5
N5 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	31	60	30	65.5
C-V მახასიათებლების გაზომვისათვის ნიმუშები								
Si 7 HfO <sub>2</sub>	Si	3.7-4.9	300	520-530	59	15	10	77.5
Si 11 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	56	20	10	116
Si 4 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	50	30	10	46.5
Si 5 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	45	40	10	41.5
Si 6 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	40	50	10	35.8
Si 8 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	30	60	10	35.7
Si 9 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	21	70	10	45.5
Si 10 HfO <sub>2</sub>		3.7-4.9	300	520-530	8	80	10	64.3

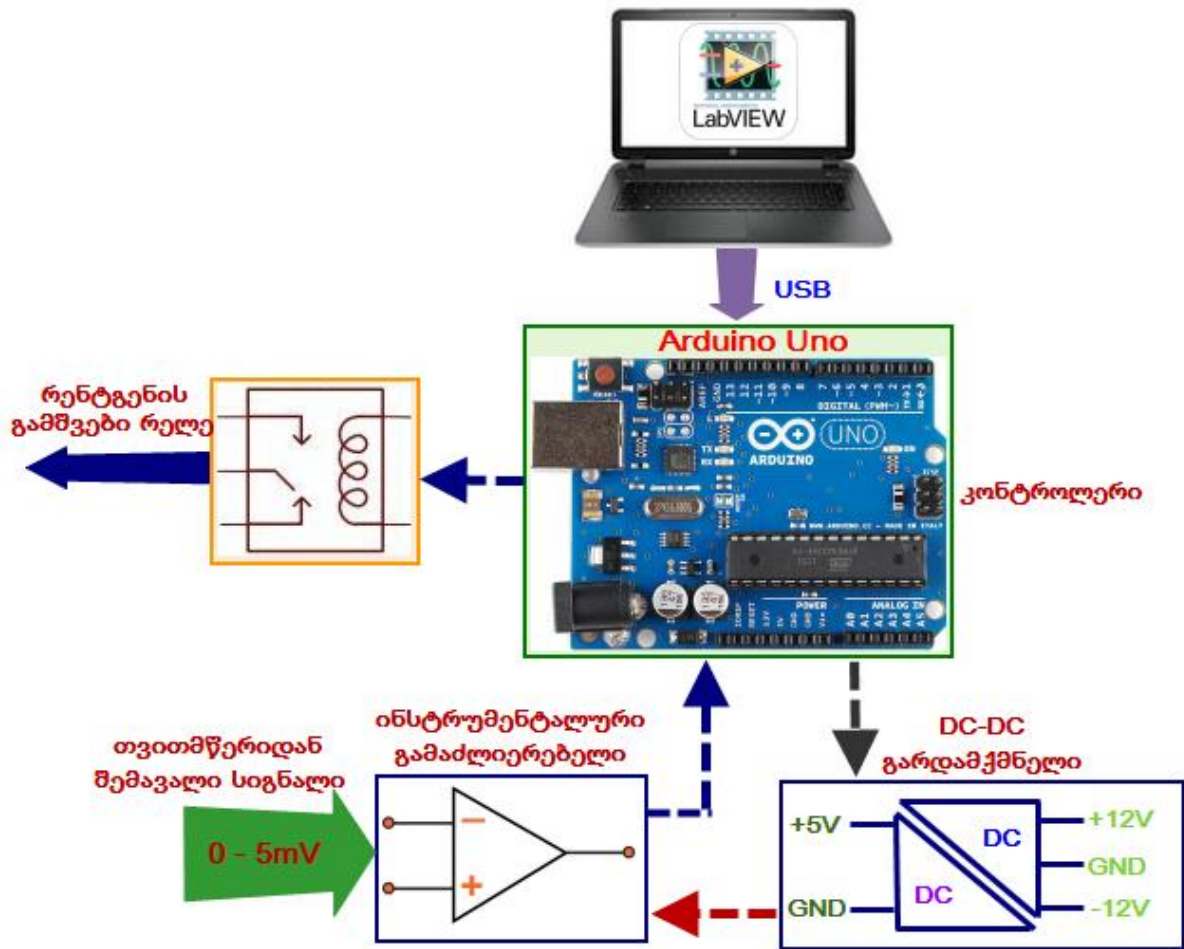
ცხრ.1 HfO<sub>2</sub>-ის მაგნეტრონული მიღების ტექნოლოგიური რეჟიმები

მიღებულ სტრუქტურებზე ჩატარდა რენტგენო სტრუქტურულ ანალიზი, რომლის შედეგების საფუძველზე იქნა დადგენილი ოპტიმალური ტექნოლოგიური პროცესები.

### 2.3. რენტგენული დანადგარის კომპიუტერული მართვის შემუშავება

საფენ საფირონის (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) და HfO<sub>2</sub> -ის სტრუქტურული კვლევისთვის გაზომვები ჩატარდა რენტგენულ დიფრაქტომეტრ DPOH-4-ზე V=21 კვ და I=12მა სამუშაო რეჟიმში. გამომსხივებელ წყაროდ გამოყენებულ იყო კობალტის (Co) მილი. გადაღება წარმოებდა სიმეტრიული მეთოდით (Θ-2Θ სკანირება). რენტგენულ დიფრაქტომეტრის კომპიუტერულად მართვის მთავარი მიზანი იყო, რენტგენული დიფრაქციის სპექტრების ქალაქზე თვითმწერის ჩანაცვლება თანამედროვე კომპიუტერული ჩაწერით. ამ პრობლემის გადასაჭრელად გამოყენებულ იქნა Arduino UNO მიკროკონტროლერი, რომელიც USB პორტით უკავშირდება კომპიუტერს და შესაბამისი LabVIEW პროგრამულ პაკეტს, რომლითაც წარმოებს მონაცემთა მიღება და დამუშავება-ჩაწერა. ძველი თვითჩამწერის შესასვლელზე მიეწოდებოდა დაბალი ამპლიტუდის ძაბვა რაც საჭიროებდა

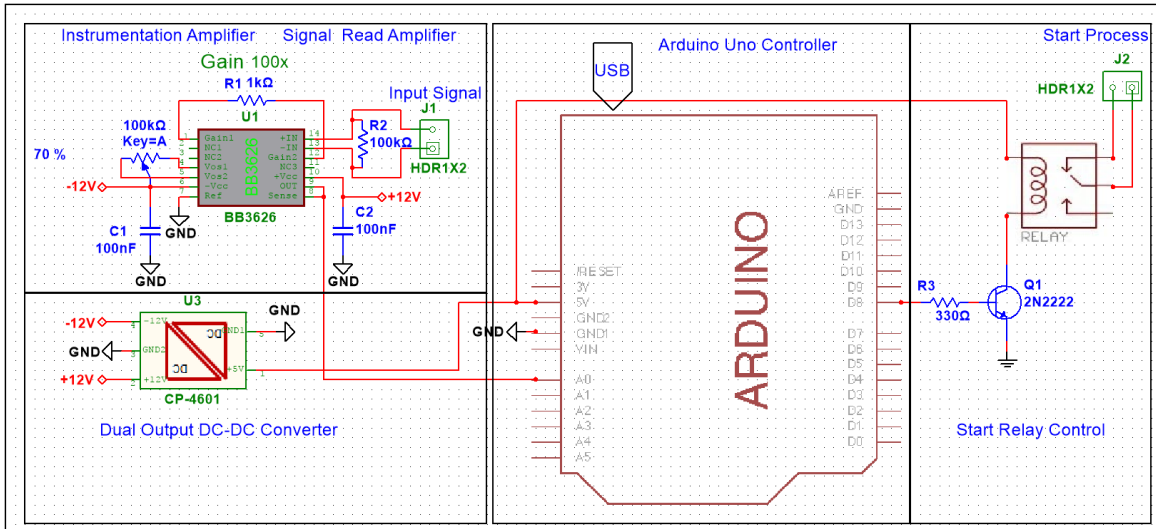
შესაბამის გაძლიერებას, რადგან კონტროლერის ანალოგურ შესასვლელს გაერჩია სიგნალის მნიშვნელობები. აპარატურული ინტერფეისის ბლოკსქემა გამოსახულია ნახ.12.



ნახ.12. რენტგენულ დიფრაქტომეტრული დანადგარის მართვის და მონაცემთა ჩაწერის კომპიუტერიზაციის ბლოკ-სქემა

თვითმწერის გამომავალი ძაბვის ამპლიტუდა იცვლება 0-5მვ ფარგლებში რაც მოითხოვდა გაძლიერებას, ამიტომაც აიწყო გამაძლიერებელი, რომელიც სიგნალს აძლიერებს 1000x-ჯერ და გაძლიერებული სიგნალი მიეწოდება Arduino UNO კონტროლერის 0 ანალოგურ პორტს და ხდება მისი დისკრეტიზაცია. გამაძლიერებელს კვებავს ორ პოლუსა DC-DC-გარდაქმნელი, რომელიც თავისთავად იკვებება კონტროლერში ჩაშენებული 5V კვების ბლოკიდან. კონტროლერი გასცემს ბრძანებას ციფრული გამოსასვლელის მე-8 პორტზე და რთავს დანადგარს მუშა რეჟიმში. ბლოკ-სქემის სრული სქემური რეალიზება ნაჩვენებია ნახ.13.



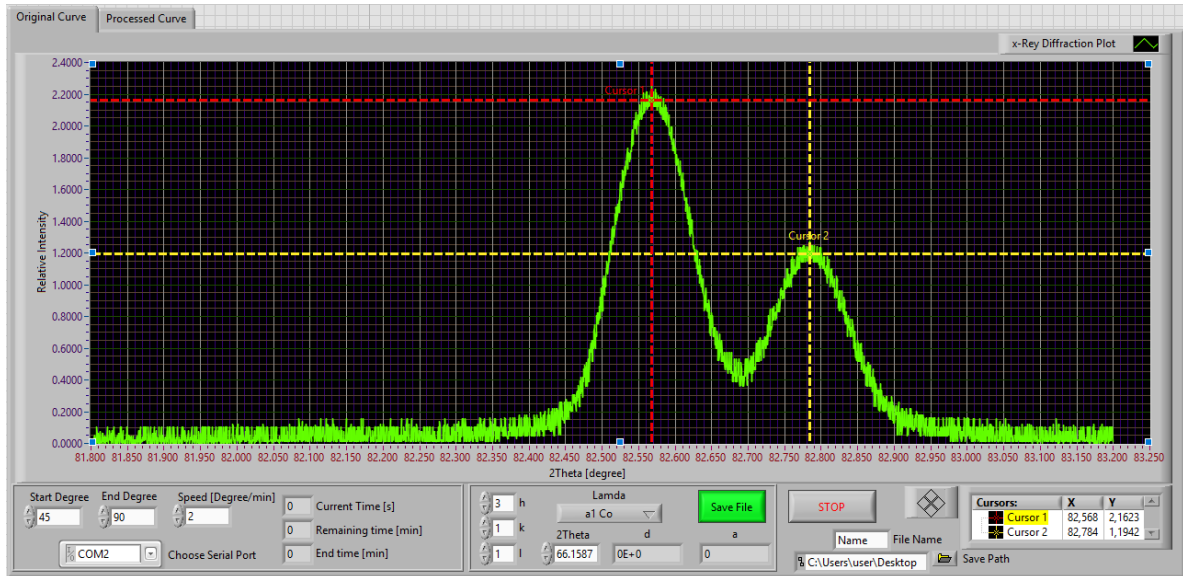


ნახ.13. (დეტალური ელექტრონული სქემა)

LabVIEW გრაფიკულ პროგრამირებით შევიმუშავეთ პროგრამა, რომელიც მართავს დანადგარს და ამუშავებს მიღებულ ინფორმაციას. პროგრამის მუშაობის ალგორითმი გამოსახულია ნახ.14.-ზე.

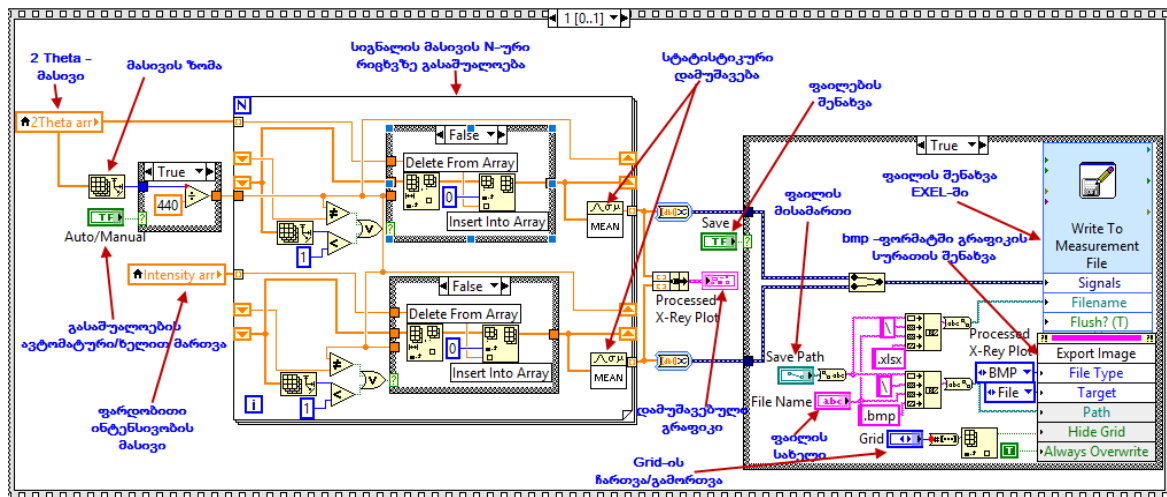
პროგრამა LINX წარმოადგენს მოდულს, რომელიც ყენდება LabVIEW პროგრამაში და ინსტალირდება კონტროლერში, როგორც მაკავშირებელი პროგრამა, რაც საშუალებას იძლევა დანადგარის კონტროლს და ინფორმაციის მიღებას. LINX-ის მოდულში გათვალისწინებულია კონტროლერის ციფრული შესასვლელ-გამოსასვლელების პორტების მართვა და ანალოგური შესასვლელების პორტების წაკითხვის ქვეპროგრამები, რომლებიც არის ძალიან მოქნილი და ადვილად გასაგები თავისი სინტაქსური პროგრამირებით.



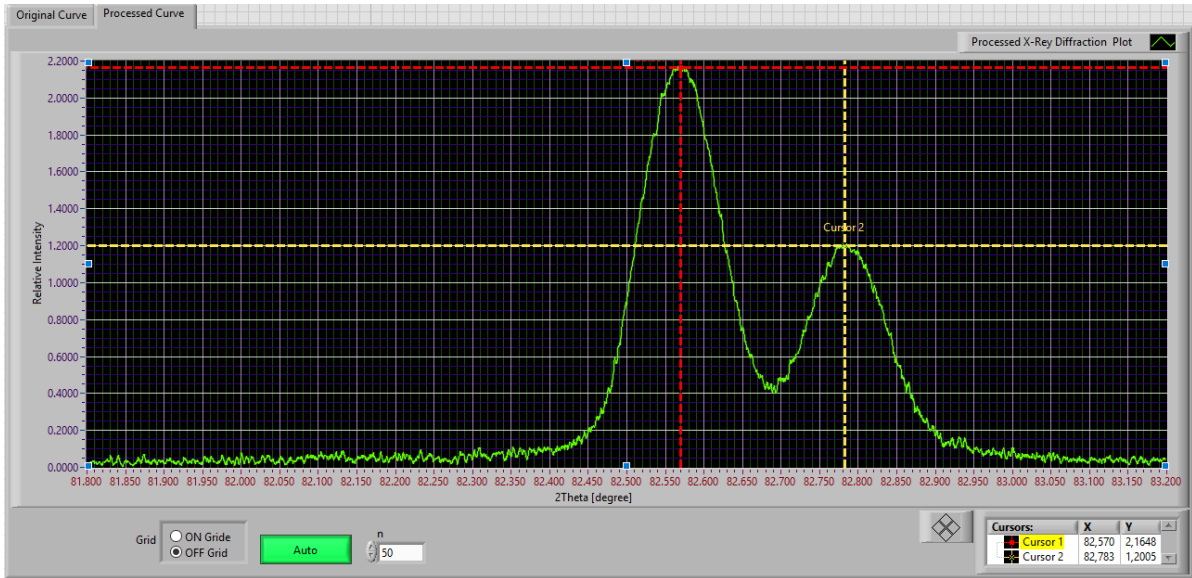


ნახ.16. პროგრამის პანელი (დამუშავებული გრაფიკით)

მეორე ეტაპზე მიღებული ანათვლები საჭიროებს დამუშავებას ხმაურისაგან, II ფრეიმი ასრულებს სიგნალის დამუშავებას (ფილტრაცია-გასაშუალოებას) და შემდეგ მიღებული ინფორმაციის Excel და bmp სტანდარტულ ფაილებში შენახვას ნახ.17. და ნახ.18.



ნახ.17. (ინფორმაციის დამუშავების და ჩაწერის პროგრამული ბლოკ სქემა)



ნახ.18. ხმაურისგან დამუშავებული გრაფიკი

პროგრამული ინტერფეისი მოწყობილია ოპერატორისათვის, რომელიც კურირებს მიმდინარე გაზომვებს, ოპერატორის მოვალეობაა შეიყვანოს საწყისი პარამეტრები როგორცაა:

- კონტროლერის პორტის ნომერი;
- სასტარტო კუთხე;
- საბოლოო კუთხე;
- კუთხის ცვლილების სიჩქარე;
- ფაილის დასახელება და შენახვის ადგილი;

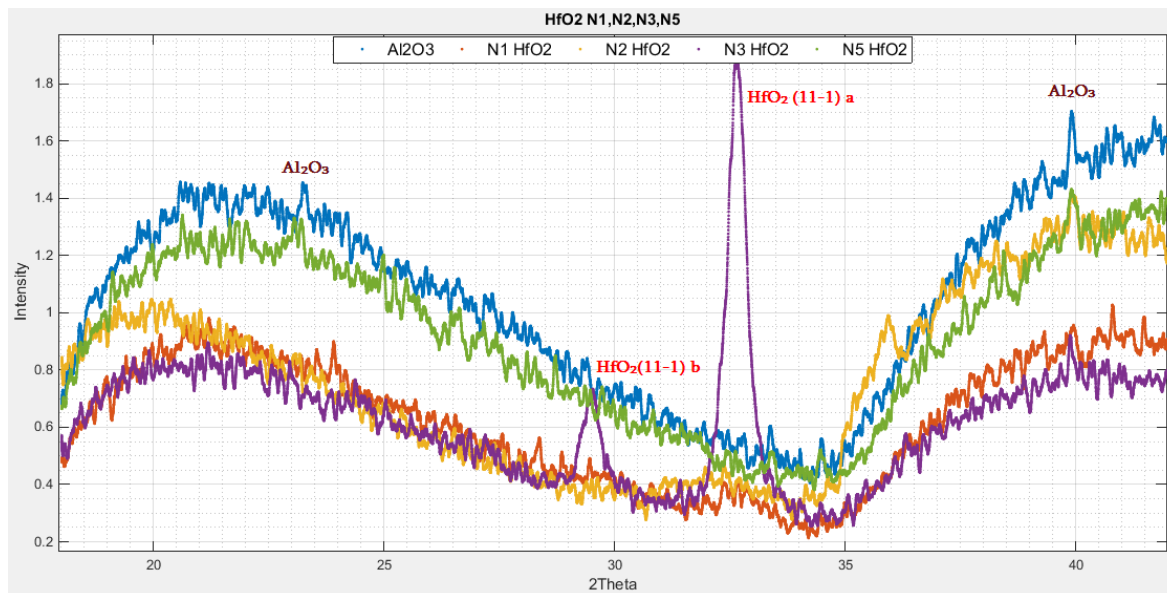
ასევე ოპერატორს შეუძლია მიიღოს ინფორმაცია:

- პროცესის მიმდინარე დროის მნიშვნელობა;
- პროცესის დარჩენილი დროის მნიშვნელობა;
- პროცესისათვის საჭირო დროის მნიშვნელობა;
- პროგრამაში ჩაშენებული ბრეგის კანონის კალკულატორი;

პროგრამის მიმდინარეობის დროს ოპერატორს შეუძლია ჩაშენებული კალკულატორით სარგებლობა, რომლითაც შეიძლება განისაზღვროს სხვადასხვა სახის რენტგენის მილაკისათვის, სიბრტყეთა შორის მანძილი და კუბური მესრის პარამეტრი. პროცესის დასრულების შემდეგ პროგრამა ავტომატურად ინახავს სტანსარტულ Excel და bmp ფაილებს.

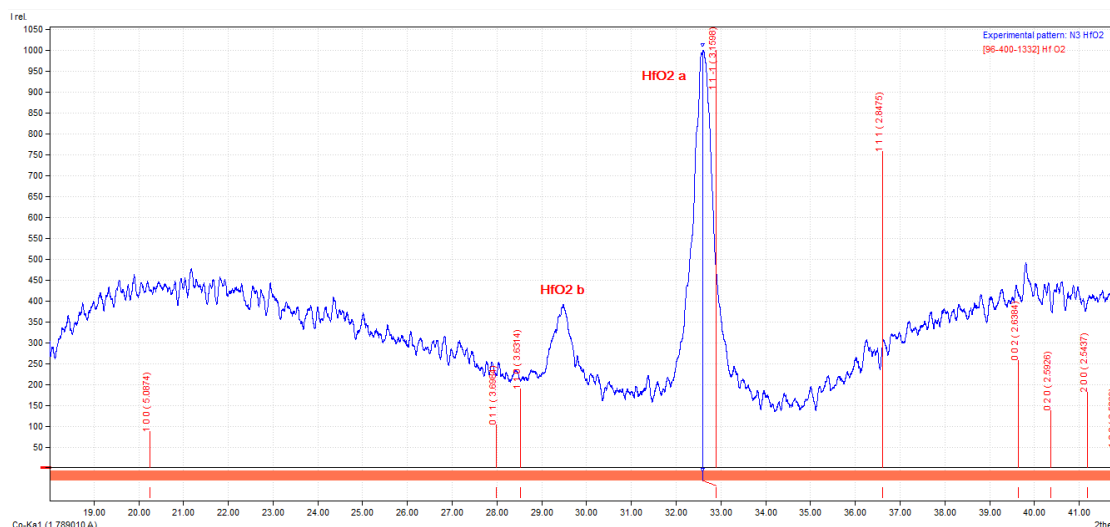
## 2.4. ჰაფნიუმის ოქსიდების რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი

HfO<sub>2</sub>-ის მაგნეტრონული მიღების შემდეგ, ჩავატარეთ მემრისტორის აქტიურ შრეების რენტგენოსტრუქტურული გაზომვები. ნახ.19-ზე გამოსახულია მიღებული ნიმუშების რენტგენოგრამები. ნახაზიდან ჩას რომ, N3 ნიმუშზე დაფიქსირდა HfO<sub>2</sub> საუკეთესო კრისტალური სტრუქტურა, რომელიც შერჩეულ იქნა მემრისტორის აქტიური



ნახ.19. (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> და HfO<sub>2</sub> ჩაწერილი რენტგენული სპექტრები 18-42°)

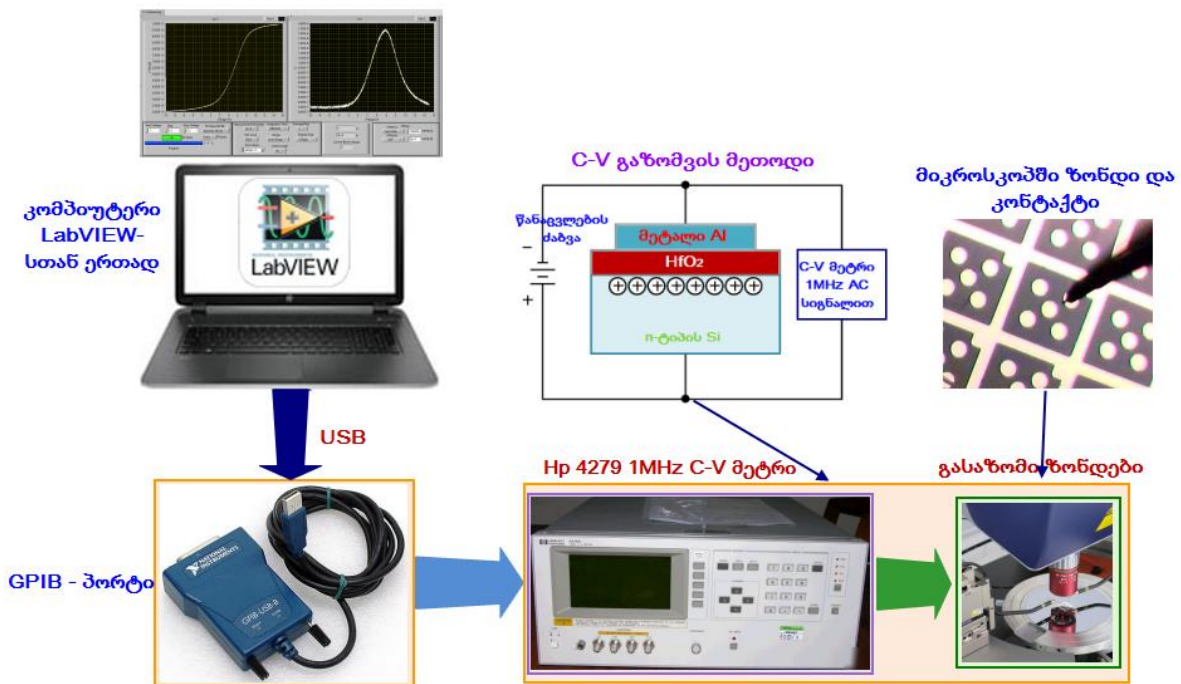
ფენის დასამზადებლად. აღნიშნული ნიმუშის რენტგენული სპექტრი შევიტანეთ სპეციალური Match3 პროგრამაში, სადაც საკვლევი HfO<sub>2</sub> ფენა შედარდა მონაცემთა ბაზაში არსებულ შაბლონს და მიეთითა სიბრტყეებს შორის მანძილი და ორიენტაცია ნახ.20.



ნახ.20. (პროგრამა Match 3 -ში არსებული ბიბლიოთეკაში HfO<sub>2</sub>თანხვედრი პიკი)

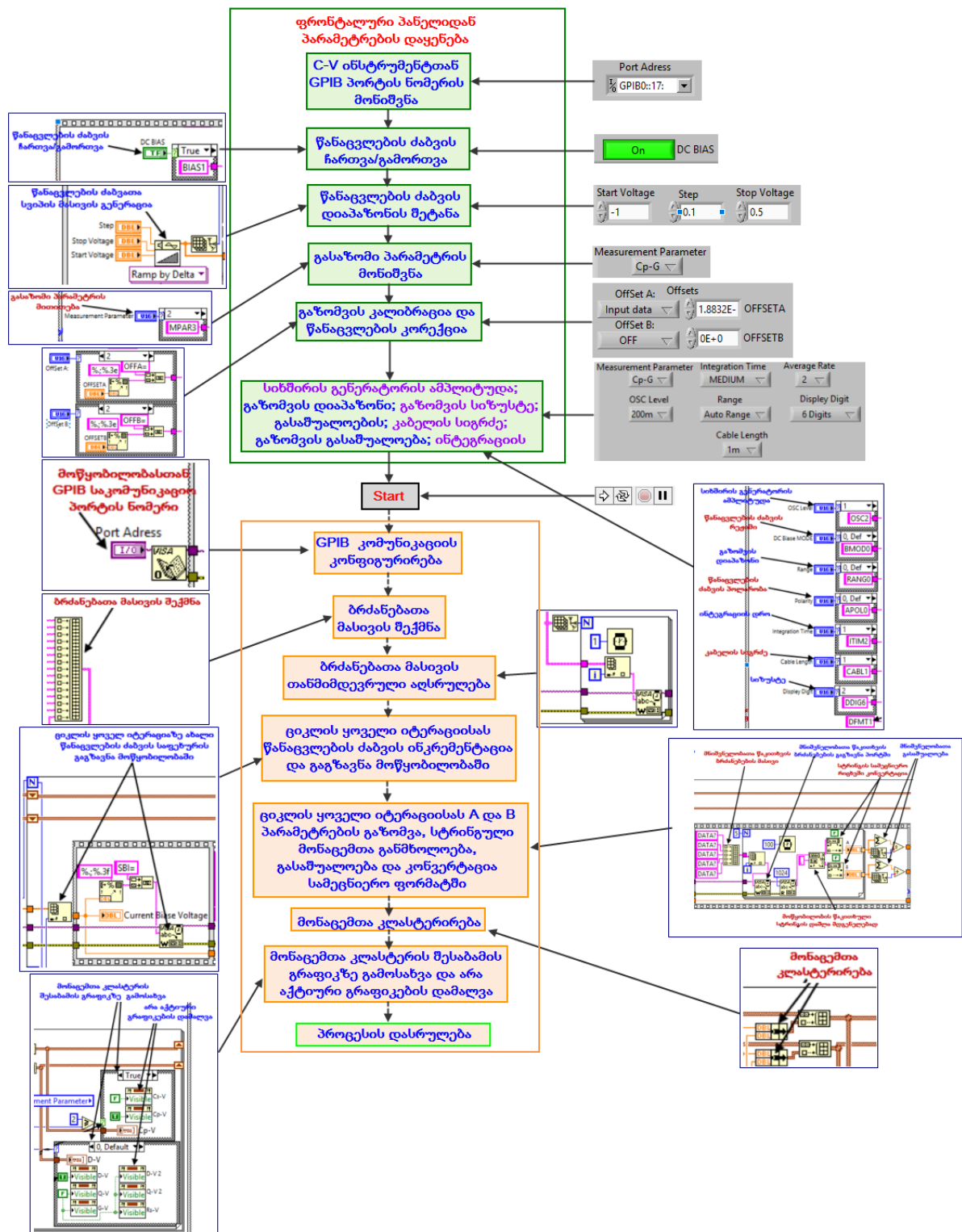
## 2.5. C-V მახასიათებლის გამოზომის კომპიუტერული მართვის შემუშავება

მემრისტორის აქტიური  $\text{HfO}_2$  შრეების ცალკეული ფენების C-V მახასიათებლების შესასწავლად დამზადდა Al- $\text{HfO}_2$ ( $\text{HfO}_x$ )-Si მდნ (მეტალი-დიელექტრიკი-ნახევარგამტარი) სტრუქტურები. სამუშაოს მთვარი მიზანი იყო, მოცემული C-V გამოზომის Agilent 4279A 1Mhz C-V Meter კომპიუტერში ავტომატურად ჩაეწერა C-V მრუდები, რომელსაც არ გააჩნდა საკუთარი პროგრამა. C-V გაზომვის პროგრამული პაკეტი გაკეთდა გრაფიკული პროგრამირების LabVIEW მეთოდით. პროგრამის მეშვეობით შესაძლებელია სხვადასხვა მდნ სტრუქტურების C-V მახასიათებლების გაზომვა. მოწყობილობის საცნობაროში [2] მოცემული შესაბამისი რეჟიმების ბრძანებები ინტეგრირებულ იქნა LabVIEW პროგრამაში, რომელიც საშუალებას იძლეოდა GPIB პორტით ავტომატურად გადაეღო C-V გრაფიკები. გამოზომი აპარატურის ბლოკ-სქემა მოცემულია ნახ.21-ზე.



ნახ.21. C-V მახასიათებლის გადასაღები ბლოკ-სქემა

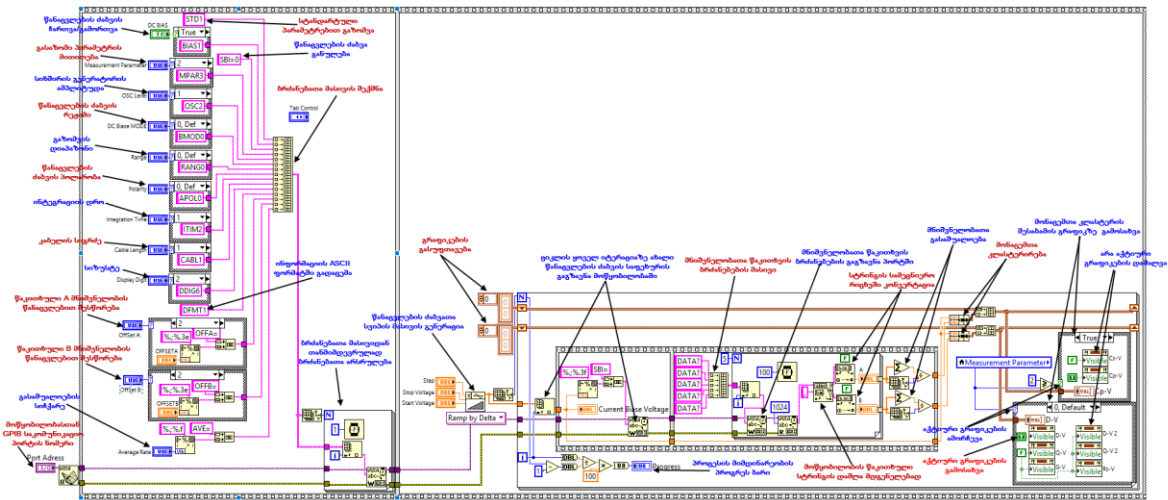
პროგრამის შესრულების ალგორითმი მოცემულია ნახ.22-ზე, სადაც წარმოდგენილია თანმიმდევრული პროცედურები, რომელიც საჭიროა C-V მახასიათებლის გასაზომად.



ნახ.22. პროგრამის შესრულების ალგორითმი

პროგრამის პანელზე წარმოდგენილია ყველა საწყისი პარამეტრის შესატანი ბერკეტები და ველები, რომელიც ოპერატორმა უნდა შეიყვანოს გაზომვის წინ. შესაბამისი პარამეტრების შეყვანის შემდეგ პროგრამა იწყებს სათანადო ბრძანებების გენერირებას და ქმნის ბრძანებათა მასივს, რომ მოწყობილობა გადაიყვანოს

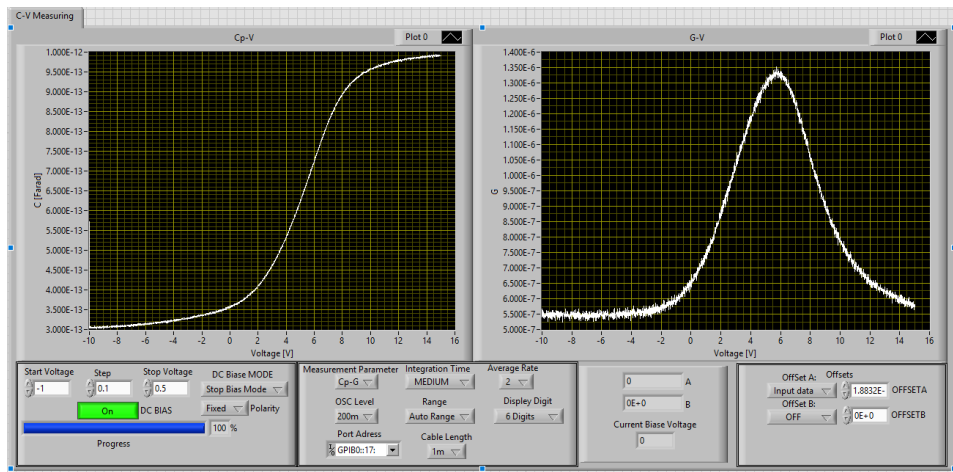
ოპერატორისგან მოთხოვნილ რეჟიმში, ბრძანებები ეგზავნება GPIB პორტში თანმიმდევრულად, რის შემდეგაც გენერირდება წანაცვლების ძაბვის მნიშვნელობათა მასივი და მოწყობილობას საფეხურებრივად ეგზავნება და თან ამავე დროს ხდება A და B პარამეტრების ათვლა და გასაშუალოება. მოწყობილობაზე შეიძლება შეიცვალოს მაღალი სიხშირის 1MHz გენერატორის ამპლიტუდა პანელზე დატანებული სარჩევით. მიღებული ანათვლები პროგრესულად აისახება გრაფიკზე. პროგრამაში პანელზე არის 8 გრაფიკი ერთმანეთზე დადებული და იმის მიხედვით თუ ოპერატორი რა პარამეტრს ამოიჩევს გააქტიურდება მხოლოდ ის გრაფიკი და გამოჩნდება, სხვები კი დაიმალება პანელიდან. სრული პროგრამა წარმოდგენილია ნახ.23. -ზე.



ნახ.23. სრული პროგრამა Hp4279 C-V მეტრისათვის LabVIEW-ში

პროგრამა წარმოადგენს ორიგინალურ შესრულებას, რადგანა არ არსებობს ამ მოდელისათვის LabVIEW-ში დაწერილი პროგრამა.

პროგრამის პანელი ნახ.24. რომელზეც გადაღებულია HfO<sub>2</sub>-ის C-V მახასიათებელი.



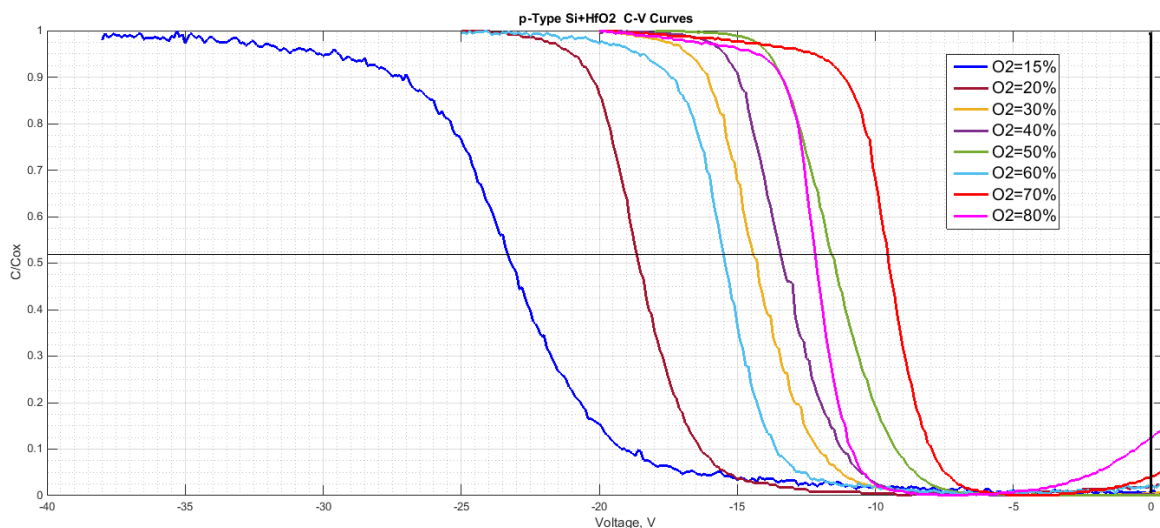
ნახ.24 HfO<sub>2</sub>-ის C-V მახასიათებელი



მოცემული გრაფიკებისა და სპეციალური კალკულატორი პროგრამების დახმარებით შეიძლება განისაზღვროს დიელექტრიკში მუხტი, მისი ნიშანი, ნახევარგამტართან საზღვარზე ზედაპირულ მდგომარეობათა სიმკვრივე და დიელექტრიკული მუდმივა.

## 2.6. ჰაფნიუმის ოქსიდებზე აგებული სტრუქტურების კვლევა C-V მახასიათებლის გამოყენებით

ნახ.25-ზე გამოსახულია მაგნეტრონული გაფრქვევით, ჟანგბადის სხვადასხვა კონცენტრაციების მქონე ჰაფნიუმის ოქსიდების მდნ-სტრუქტურების ვოლტ-ფარადული მახასიათებლები.



ნახ. 25. მდნ-სტრუქტურების ვოლტ-ფარადული მახასიათებლები

როგორც ნახაზიდან ჩანს ყველა სახის ჰაფნიუმის ოქსიდში დაიმზირება დადებითი მუხტი. აღსანიშნავია, რომ მრუდები წაინაცვლებენ მონოტონურად ნულისკენ ჟანგბადის 15%-დან 50%-შემცველობამდე, შემდეგ შეინიშნება არამონოტონური ტენდენციები. ნულთან მაქსიმალური მიახლოება გვაქვს ჟანგბადის 70% შემცველობისას. საერთო სურათიდან გამოიკვეთა, რომ ჟანგბადის 20% და 70% ჰაფნიუმის ოქსიდების მრუდები მკვეთრად პარალელურია, რაც მიუთითებს მათში მსგავის მუხტების არსებობას, ამასთანვე ნულიდან დაშორება არის უკიდურესად შორი და ახლო, ამიტომ მათში მუხტების რაოდენობის მკვეთრი განსხვავება ანუ გრადიენტი იქნება, რაც პერსპექტიული წინაპირობაა მათი მემრისტორის აქტიურ შრეში გამოყენებისთვის.

სადიპლომო სამუშაოში მემრისტორის დასამზადებლად გამოყენებულია სწორედ ეს ორი, 20% და 70%-იანი ჰაფნიუმის ოქსიდურ შრეები.

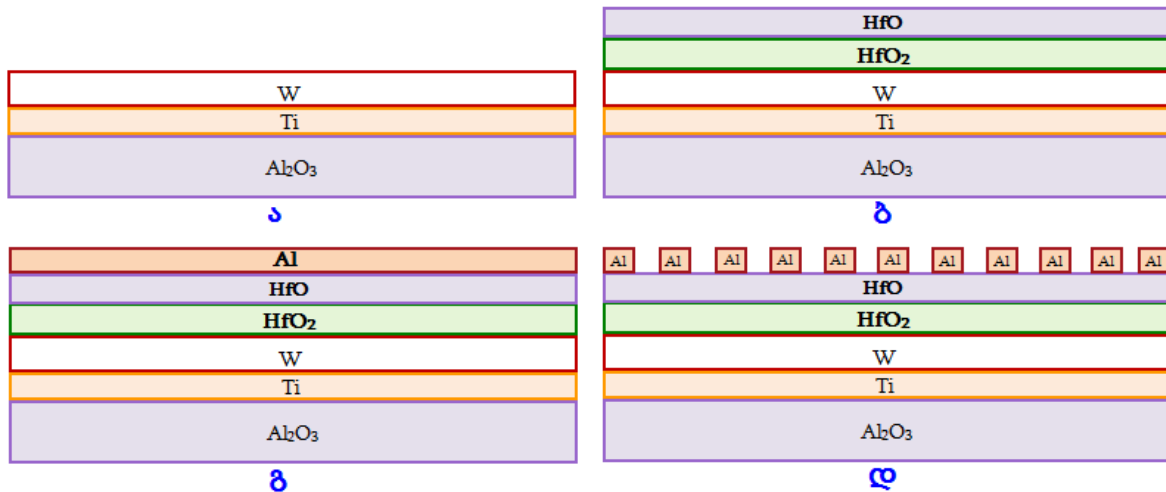
p-ტიპის სილიციუმზე 70% –იანი ჟანგბადის შემცველი ჰაფნიუმის ოქსიდში შემავალი მუხტის რაოდენობა, გაცილებით ნაკლებია ვიდრე 20 %-იანი ჟანგბადის შემცველ ჰაფნიუმის ოქსიდში. ამიტომ 70%-იანი ჰაფნიუმის ოქსიდი არის სრული დიელექტრიკი  $HfO_2$ , ხოლო 20 %-იანი - არასრული  $HfO_x$  ( $x < 2$ ). ცხრ.2-ში მოცემულია სრული და არასრული ჰაფნიუმის ოქსიდის ელექტრული და დიელექტრიკული პარამეტრები გამოთვლილი C-V მახასიათებლებიდან.

ნიმუშის დასახელება	O <sub>2</sub> კონც. (%)	V <sub>FB</sub> (ვ)	W <sub>MS</sub> (p-Si) (ვ)	Q <sub>EFF</sub> (x10 <sup>-6</sup> ) კ/სმ <sup>2</sup>	ε	N <sub>EFF</sub> (x10 <sup>12</sup> )სმ <sup>-2</sup>	d (ფმ)	C <sub>FB</sub> (x10 <sup>-12</sup> )ფფ
Si 11 HfO <sub>2</sub>	20	-23.25	-0.95	1.76	56	11.0	116	2.21
Si 9 HfO <sub>2</sub>	70	-9.5		0.71	21	4.4	45.5	2.34

ცხრ.2 (C-V მახასიათებლიდან გამოთვლილი პარამეტრები)

### 2.7. მემრისტორის ფორმირება ჰაფნიუმის ოქსიდების აქტიური შრით

იმის შემდეგ, რაც მიღებულ და შესწავლილ იქნა ჰაფნიუმის სრული და არასრული ოქსიდების ( $HfO_2$ - $HfO_x$ ) თვისებები, საჭიროა მათი გამოყენება მემრისტორის აქტიურ შრედ, რისთვისაც დამუშავდა მემრისტორის დასამზადებელი ტექნოლოგიური მარშრუტი და გაიზომა მიღებული მემრისტორის მახასიათებლები (ნახ.26).



ნახ.26 მემრისტორის ტექნოლოგიური მარშრუტი

1. მაგნეტრონულ დანადგარში ქიმიურად დამუშავებული **C Memristor** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50mm) ნიმუშის მოთავსება;
2. ადგეზიის გაუმჯობესების მიზნით 99.999% სისუფთავის Ti (ტიტანი)-ის მაგნეტრონული გაფრქვევა არგონის არეში, ჯამური წნევა შეადგენდა  $P_{Ar}=1,5 \times 10^{-2}$

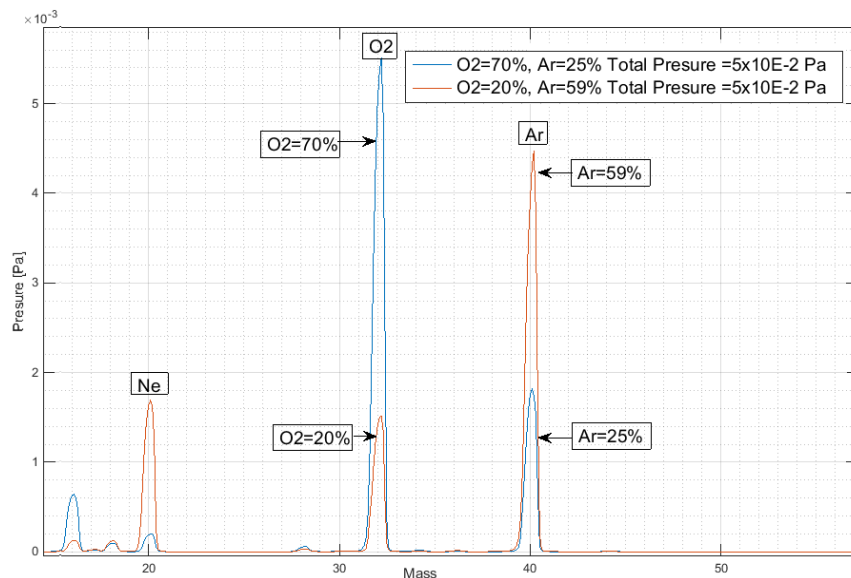
პა, გაზომილი (BMB-14) ხელსაწყოთი. მაგნეტრონის სამუშაო პირობები: ძაბვა  $U=400V$ , დენი  $I=1A$ , საფენის ტემპერატურა  $T=200^{\circ}C$  და დაფენის დრო  $t=15წმ$ .

3. მემრისტორის ქვედა კონტაქტისათვის 99.999% სისუფთავის W (ვოლფრამი) –ის მაგნეტრონული გაფრქვევა არგონის არეში, ჯამური წნევა შეადგენდა  $P_{Ar}=1,5 \times 10^{-2}$  პა, გაზომილი (BMB-14) ხელსაწყოთი. მაგნეტრონზე სამუშაო პირობები იყო: ძაბვა  $U=400V$ , დენი  $I=1A$ , საფენის ტემპერატურა  $T=200^{\circ}C$  და დაფენის დრო  $t=1წთ$ . ეს გამოსახულია (ნახ.26 ა);

4. მემრისტორის აქტიური შრის ორ ნაწილად მაგნეტრონული მიღება:

I. მიღებული სტრუქტურაზე 99.999% სისუფთავის Hf მაგნეტრონული გაფრქვევით ჟანგბადის და არგონის პარციალურ წნევებზე, რომელიც მასპექტრომეტრით SRS RGA200 რეგულირდებოდა  $P_{Ar}=25\%$ ,  $P_{O_2}=70\%$  ჯამური წნევის  $3,7- 4,9 \times 10^{-2}$  პა. (BMB-14) პირობებში. Hf-ის მაგნეტრონი გაფრქვევა მიმდინარეობდა  $U \approx 300V$  ძაბვაზე,  $I=300mA$  დენზე, საფენის ტემპერატურა იყო  $T=300^{\circ}C$ , დრო  $t=7,5წთ$ ;

II. ვაკუუმის დარღვევის გარეშე, პროცესის მეორე ეტაპზე შეიცვალა მხოლოდ არგონის და ჟანგბადის პარციალურ წნევებზე, რომელიც მასპექტრომეტრით SRS RGA200 რეგულირდებოდა.  $P_{O_2}=70\%$   $P_{Ar}=25\%$ , ჯამური წნევის  $3,7- 4,9 \times 10^{-2}$  პა. (BMB-14) პირობებში. Hf-ის მაგნეტრონი გაფრქვევა მიმდინარეობდა  $U \approx 300V$  ძაბვაზე,  $I=300mA$  დენზე, საფენის ტემპერატურა იყო  $T=300^{\circ}C$ , დრო  $t=7,5წთ$  (ნახ.26ბ.); მას-პექტრომეტრზე გამოსახული პარციალური წნევები მოყვანილია ნახ.27-ზე.



ნახ.27 მას-პექტრომეტრზე გამოსახული პარციალური წნევები

5. მიღებულ სტრუქტურაზე რეზისტულ-თერმული აორთქნებით დაეფინა Al (ალუმინი) ზედა კონტაქტისათვის (ნახ.26გ), რომელზედაც გაკეთდა ფოტოლიტოგრაფია და მიღებულ იქნა საკონტაქტო არეები დიამეტრით 60მკმ (ნახ.26 დ).

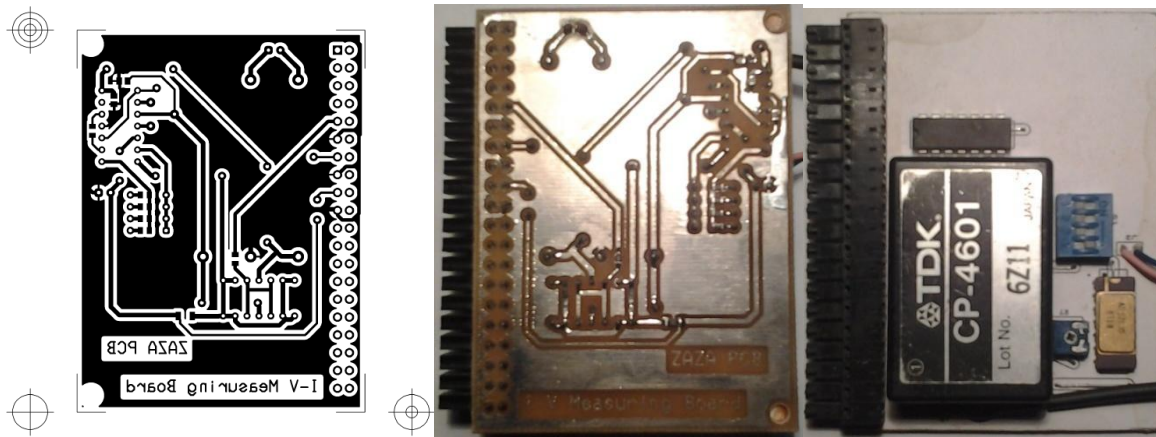
## 2.8. მემრისტორის ვოლტ-ამპერული I-V მახასიათებლების გამზომის შემუშავება

მემრისტორის ვოლტ-ამპერული I-V მახასიათებლების გასაზომად, მემრისტორზე უნდა მიწოდებულიყო სხვადასხვა სიხშირის 1-3000ჰც დიაპაზონში ერთპერიოდისანი სინუსოიდალური და ხერხისებრი სიგნალი, სხვადასხვა ამპლიტუდის კონტროლით და ამავე დროს განგვესაზღვრა მემრისტორში გამავალი დენი და ძაბვა. ამ ამოცანის გადასაჭრელად შემუშავდა თანამედროვე და არსებულთან გაცილებით იაფი კომპიუტიზირებული გამზომი სისტემა, რომელიც მოიცავს პროგრამულ და აპარატურულ მხარეს. პროგრამის შესაქმნელად გამოყენებულ იქნა NI LabVIEW-ს პროგრამული და NI MyDAQ აპარატურული უზრუნველყოფა, მათი ალგორითმული კავშირი და ელექტრონული სქემა. MyDAQ - მოწყობილობა უზრუნველყოფს სიხშირული გენერატორის რეალიზებას და დენის და ძაბვის განსაზღვრას, ხოლო ელექტრული სქემა უზრუნველყოფს MyDAQ-დან გამომავალი სიხშირული გენერატორის სიგნალის გამეორებას და მიწოდებას გასაზომი მემრისტორის ნიმუშზე. ამრიგად ელექტრულ სქემაში ინტეგრირებულ იქნა ძაბვის გამამეორებელის სქემა და დენის შუნტზე ვარდნილი ძაბვის გამაძლიერებელი, რომელსაც აქვს სხვადასხვა გაძლიერების კოეფიციენტი და ოპერატორი ირჩევს გასაზომი დენის მიხედვით გაძლიერების კოეფიციენტს. მემრისტორის ვოლტ-ამპერული I-V მახასიათებლების გამზომის აპარატურული ბლოკ-სქემა ნაჩვენებია ნახ.28-ზე.



ნაბეჭდი დაფა მაგრდება MyDAQ ბორდზე და USB პორტით უკავშირდება კომპიუტერს. შესაბამისი პროგრამით ხდება ამ აპარატურის მართვა.

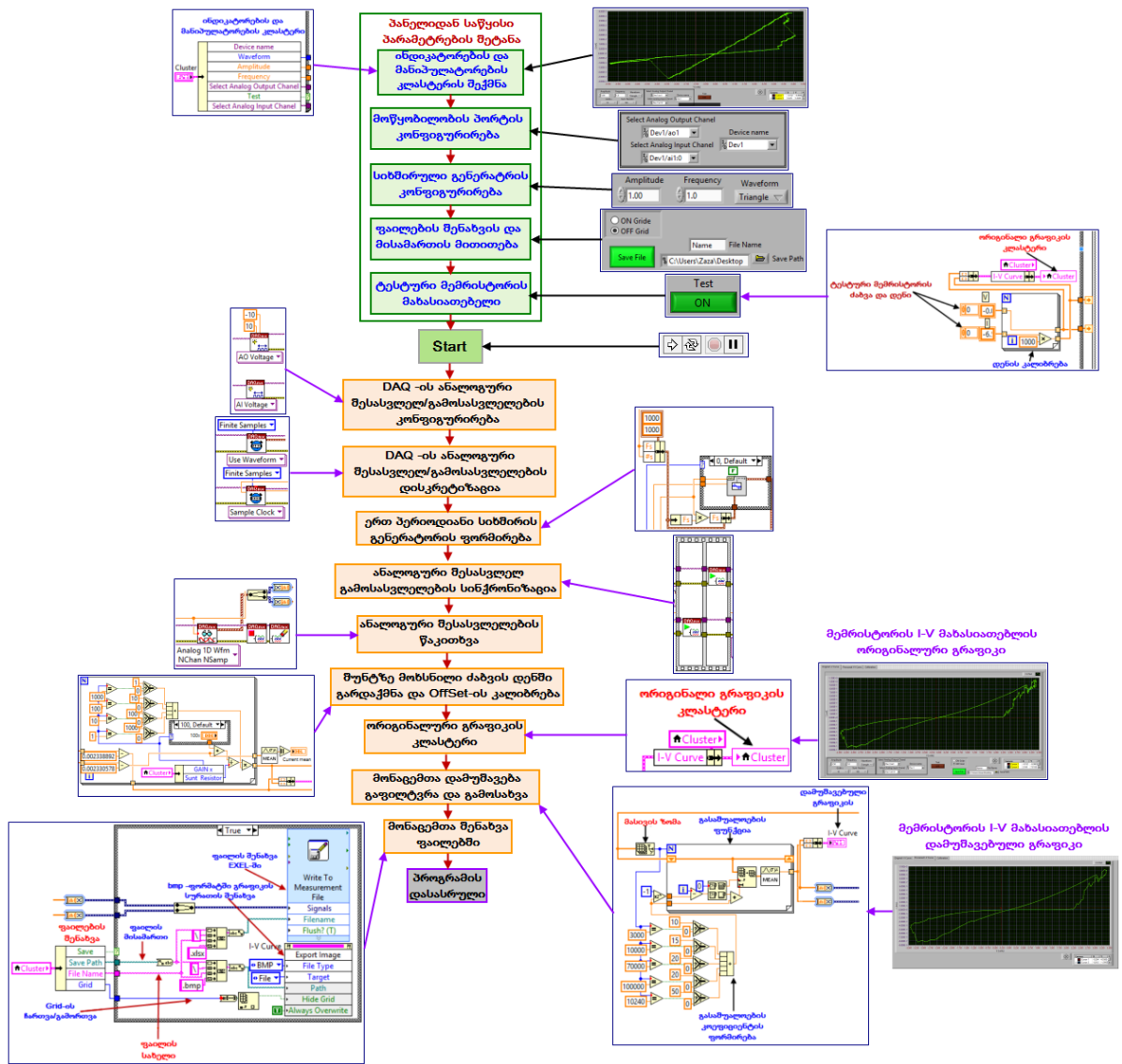
დაპროექტებული სქემის მიხედვით, შეიქმნა პლატის შაბლონი, და შემდეგში რეალიზებულ იქნა ამ პლატის აწყობა ნახ.30.



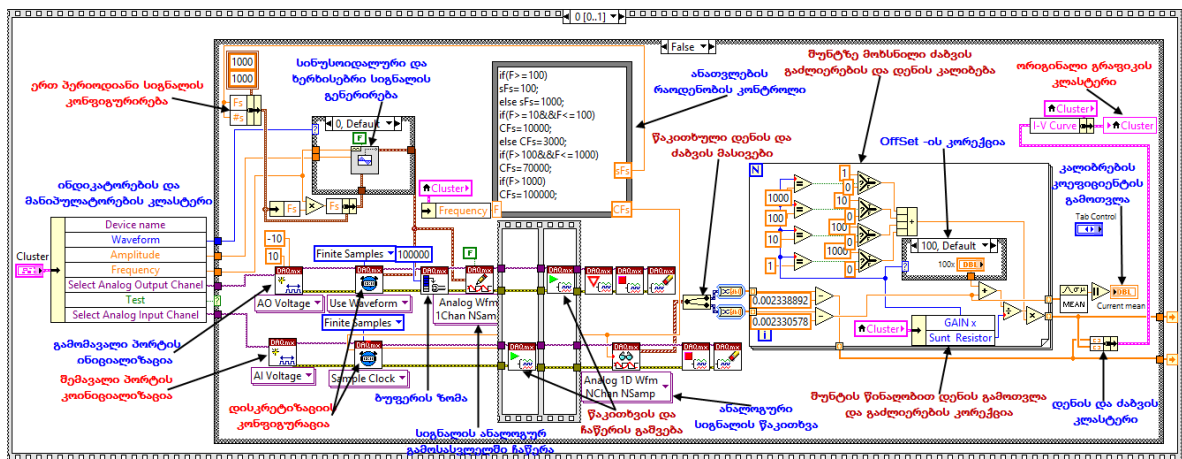
ნახ.30 ნაბეჭდი დაფის შაბლონი და აწყობილი ნაბეჭდი დაფა ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გადამღები სქემა გამოყენებულ იქნა მიღებული მემრისტორის I-V მახასიათებლების გადასაღებად.

პროგრამული უზრუნველყოფის ალგორითმი, რომელიც მართავს მემრისტორების I-V მახასიათებლების გამზომ სქემას და myDAQ-ს, წარმოდგენილია ნახ.31-ზე. პროგრამა შემუშავებულია გრაფიკული პროგრამირების LabVIEW- პროგრამაში. ალგორითმში წარმოდგენილია თითოეული პუნქტის თანმიმდევრობა, რომ გაიზომოს მემრისტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები. პროგრამაში ჩაშენებულია ქარხნული მემრისტორის (BS-AF-W 16DIP) ტესტური გაზომვის მრუდი. გაზომვის დაწყებისას ოპერატორმა უნდა შეიყვანოს პანელიდან ძაბვის ამპლიტუდა და სიხშირე, ასევე შესაძლებელია ფაილის სახელი და მისამართი. პროგრამა შედგება სამ მოდულისგან:

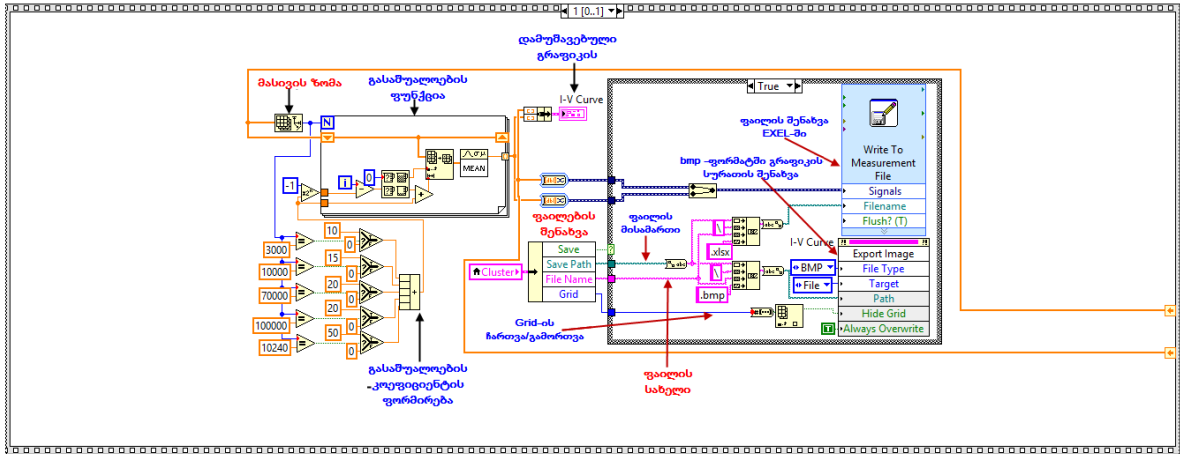
1. მონაცემების მიღების და კლასტერიზების მოდული ნახ.32;
2. მონაცემების გაფილტვრის, დამუშავების და შენახვის მოდული ნახ.33;
3. ტესტური გაზომვა ქარხნული მემრისტორის (BS-AF-W 16DIP) ნახ.34;



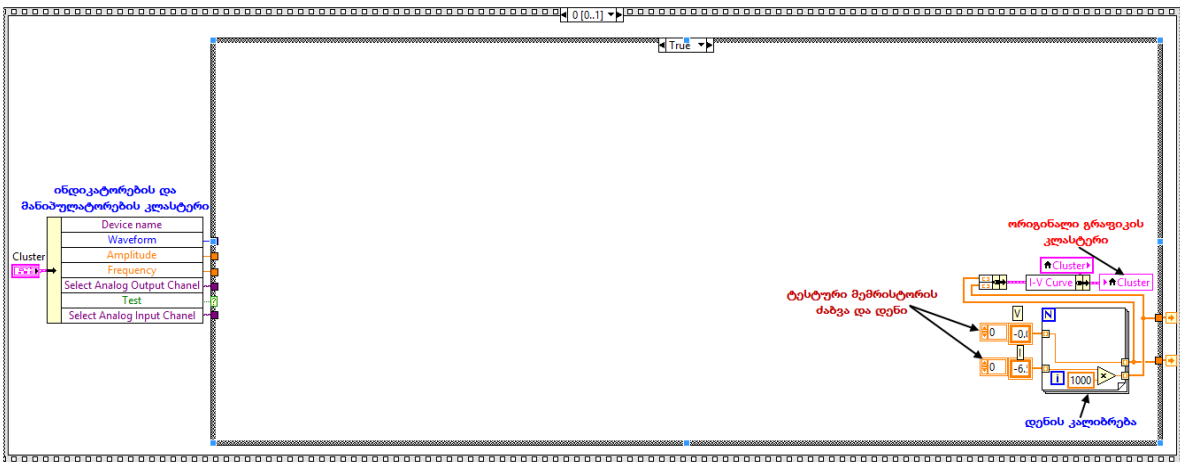
ნახ.31 მემრისტორის ვოლტ-ამპერული I-V მახასიათებლების გამზომი პროგრამის ალგორითმი



ნახ.32 მონაცემების მიღების და კლასტერირების ფრეიმი

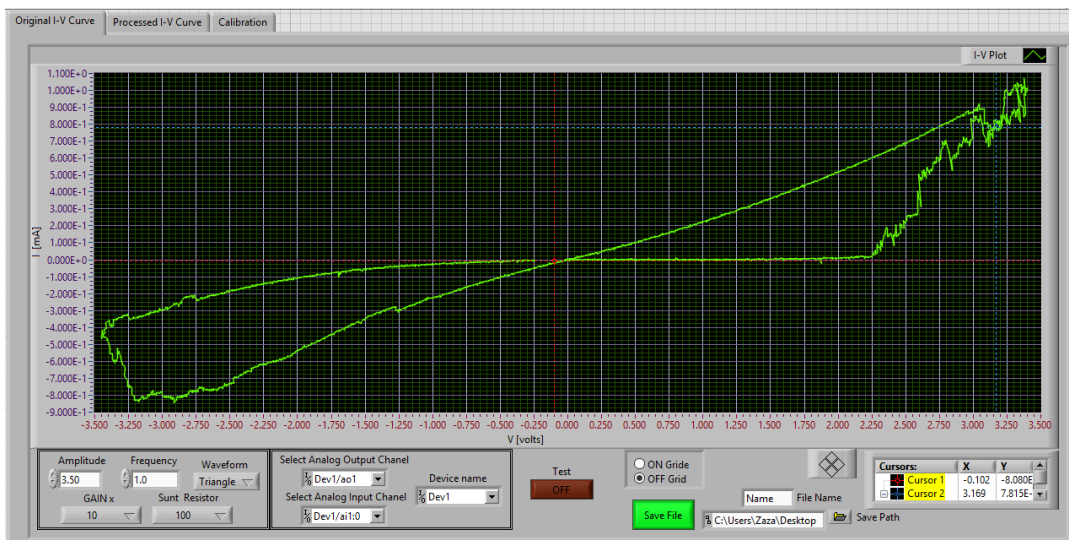


ნახ.33 მონაცემების გაფილტვრის, დამუშავების და შენახვის ფრეიმი



ნახ.34 სრული პროგრამა LabVIEW -ში

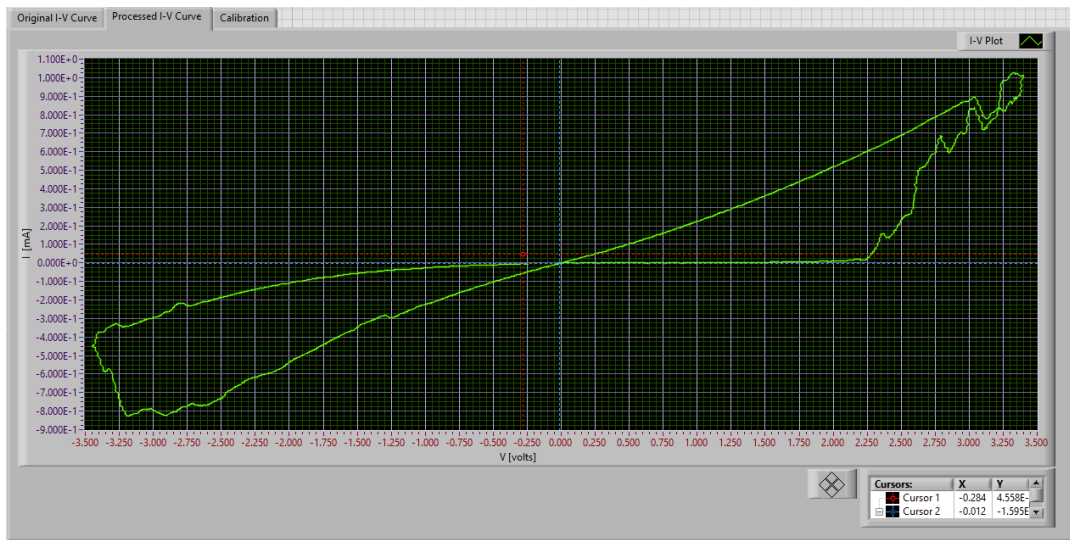
პროგრამაში მემრისტორის ორიგინალური სიგნალის მიღების ინტერფეისი ნაჩვენებია ნახ.35-ზე.



ნახ.35 პროგრამის სამუშაო პანელი და მემრისტორის I-V ორიგინალური მრუდი ხმაურითურთ

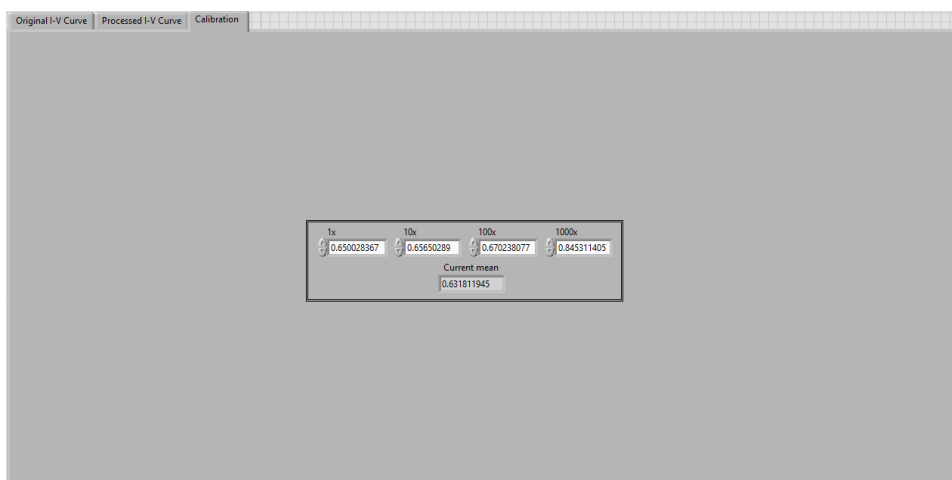


ორიგინალური მემრისტორის გრაფიკზე შეინიშნება ხმაურის დეფექტები, ამრიგად დამუშავებული გრაფიკი ნაჩვენებია ნახ.36-ზე.



ნახ.36 ხმაურისაგან დამუშავებული მემრისტორის I-V მრუდი

I-V გამზომ მოწყობილობას აქვს დენის გაზომვის დიაპაზონის რეგულირება სხვადასხვა გაძლიერების კოეფიციენტით, რომელიც იმართება სპეციალურად პლატაზე განთავსებული მიკროგადამრთველებით, ყოველი გაძლიერების შეცვლისათვის პროგრამაში ავტომატურად შედის გრაფიკის წანაცვლების კორექციის კოეფიციენტები, დროთა განმავლობაში ეს კოეფიციენტები შეიძლება შეიცვალოს ტემპერატურული ცვლილების გამო და საჭიროა ხელახალი დაკალიბრება შესაბამისი გაძლიერებისათვის ნახ.37. აქვე არის ჩაშენებული კოეფიციენტის გამოთვლის ველი, რომელიც უნდა ჩაიწეროს შესაბამისი გაძლიერების ველში, რის შემდეგაც მოხდება წანაცვლების კორექცია.

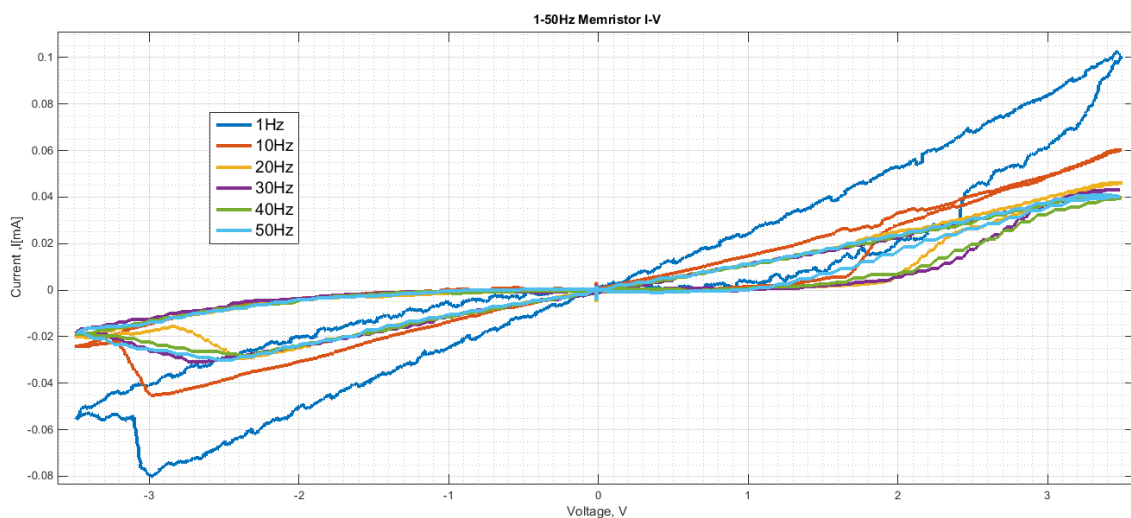


ნახ.37 მოწყობილობის კალიბრების კოეფიციენტები

დისპლეიზე შესაძლებელია სასურველი პარამეტრების ურთიერთ დამოკიდებულების დამზერა, როგორც გრაფიკული ისე ცხრილური სახით, ასევე შესაძლებელია მიღებული პარამეტრების დამუშავება როგორც ექსელში, ისე სხვა ნებისმიერ პროგრამაში.

## 2.9. მემრისტორის კვლევა ვოლტ-ამპერული მახასიათებლით

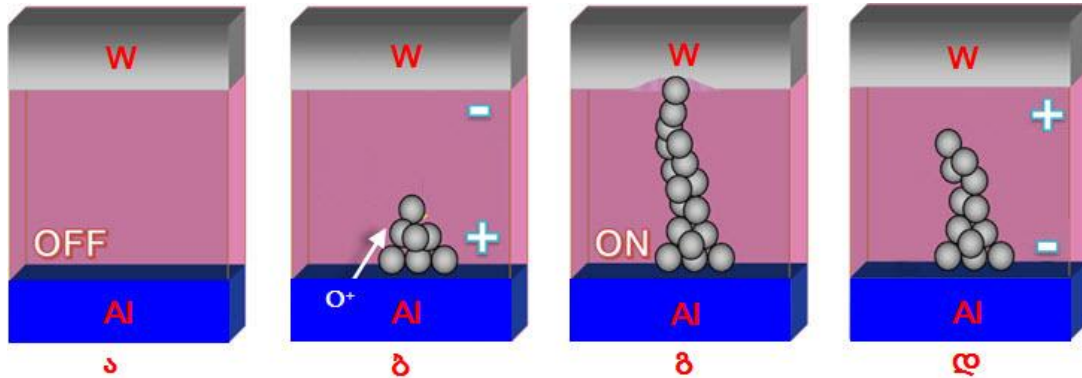
ჰაფნიუმის აქტიურ ფენაზე ტექნოლოგიურად მიღებული მემრისტორის ელექტრული მახასიათებლები გაიზომა ზემოთ აღწერილი პროგრამული და აპარატურული უზრუნველყოფით. ვოლტ-ამპერული I-V გაზომვები ჩატარდა სხვადასხვა სიხშირულ დიაპაზონში 1-50ჰც. ნახ.38-ზე გამოსახულია მიღებული მემრისტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები სხვადასხვა სიხშირულ დიაპაზონში. როგორც ნახაზიდან ჩანს, სიხშირის ზრდით იკლებს ჰისტერეზისის მარყუჟის ფართობი, I-V მახასიათებელი მისწრაფვის წრფივ დამოკიდებულებასა და ჰისტერეზისის მარყუჟი თანდათანობით ქრება.



ნახ.38 მემრისტორის I-V მახასიათებლების სიხშირული დამოკიდებულება

ნახ.39-ზე მოცემულია ჟანგბადის ვაკანსიების მოძრაობის მექანიზმი, რომელიცაა მემრისტორის მუშაობის საფუძველი. ნახ.39ა შეესაბამება მემრისტორის საწყის მდგომარეობას, როდესაც მასზე ძაბვა არაა მოდებული. გარე დადებითი ძაბვის მოდებისას მმართველ ელექტროდზე  $HfO_x$ -ის, ალუმინის კონტაქტის მხარეს არსებულ ჟანგბადის დადებითი ვაკანსიები იწყებენ მოძრაობას „+“-დან „-“ მიმართულებით (ნახ.39ბ), რაც იწვევს აქტიურ შრეში, ელექტროდის საწინააღმდეგო მხარეს  $HfO_x$ -ში

არსებული დადებითი იონებით ვირტუალური საზღვრის წანაცვლებას  $HfO_2$ -ის, ვოლფრამის მხარისკენ. იონების გადანაწილება ცვლის ორი შრის წინააღმდეგობას, რაც განაპირობებს საერთო წინააღმდეგობის შემცირებას, რომელსაც შეესაბამება მემრისტორის ჩართვის მდგომარეობა (ნახ.39გ). ელექტროდებზე ძაბვის პოლარობის შეცვლით ჟანგბადის დადებითი ვაკანსიები იწყებენ საწყის მდგომარეობაში დაბრუნებას, რითაც სრული წინააღმდეგობის მნიშვნელობა იზრდება, რასაც ეწოდება გამორთვის რეჟიმი (ნახ.39დ), ანუ მემრისტორი დაუბრუნდა საწყის მდგომარეობას.



ნახ.39 მემრისტორში ჟანგბადის ვაკანსიების გადაადგილების მექანიზმი მიღებული ჰაფნიუმის ოქსიდზე დამზადებული მემრისტორის ელექტრული მახასიათებლები მოცემულია, ცხრ.3-ზე.

სიხშირე [ჰც]	ჩართვის წინააღმდეგობა $R_{on}$ [კომი]	გამორთვის წინააღმდეგობა $R_{off}$ [კომი]	$R_{off} / R_{on}$ წინააღმდეგობის ფარდობა	მარყუჟის სიდიდე +1ჰ ძაბვაზე $\Delta I$ [მკა]
1	34	280	8.2	20
10	56.6	340	6.0	15
20	75.5	400	5.3	13
30	80.9	340	4.2	12
40	85	320	3.8	11
50	85	240	2.8	10

ცხრ.3 მემრისტორის ელექტრული მახასიათებლები

## დასკვნა

1. შეიქმნა და შემუშავდა სქემის ახალი ელემენტის – მემრისტორის და მისი აქტიური შრეების პარამეტრების გამზომი დანადგარ-მოწყობილობების: რენტგენო-სტრუქტურული ანალიზის, ვოლტ-ფარადული და ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების კომპიუტერული მართვის სისტემები;

2. შემუშავდა მემრისტორის ფორმირების ტექნოლოგიური მარშრუტი, მასში აქტიურ შრებად  $\text{HfO}_2\text{-HfO}_x$  ( $x < 2$ ) ოქსიდების გამოყენებით;

3. შესწავლილ იქნა მემრისტორში აქტიურ შრედ გამოყენებული ჰაფნიუმის ოქსიდის ტექნოლოგიური პარამეტრები, რომელმაც აჩვენა, რომ მაგნეტრონული გაფრქვევის ტექნოლოგიის გამოყენებით, ოპტიმალური პარამეტრების მქონე მემრისტორი მიიღება ჰაფნიუმის ოქსიდის ჟანგბად-არგონის აირის ნარევი ფორმირებისას, 70 და 20% ჟანგბადის შემცველი ჰაფნიუმის ოქსიდის გამოყენებით;

4. მიღებულ მემრისტორის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებლებზე დაიმზირება ჰისტერეზი, ჩაკეტილ და ღია წინალობათა ფარდობა საშუალოდ ტოლია  $R_{OFF} / R_{ON} = 5$ .

ზოგადად, მიღებული მემრისტორის პარამეტრების შედარებით მათ უცხოურ ანალოგებთან, შეიძლება ითქვას, რომ ისინი სრულად აკმაყოფილებენ მათ წინაშე წაყენებულ პირობებს და შეიძლება მათი გამოყენება ნანოელექტრონულ ხელსაწყოებში.

## გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] B. D. CULLITY Elements of X-RAY DIFFRACTION SECOND EDITION 1978 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 569p;
- [2] Agilent 4279A 1Mhz C-V Meter (Including Options 003),2000,245p;
- [3] C-V Characterization of MOS capacitors using the model 4200-SCS parameter analyzer,2007,10p;
- [4] Virginio Midili Realization of a capacitance-voltage measurement system for semiconductor characterization, Master's Thesis Espoo, 2012, 78p;
- [5] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin, Matt Nawrocki , LabVIEW Advanced Programing Techniques second Edition,2007,520p;
- [6] Introduction to LabVIEW HANS-PETTER HALVORSEN, 2011,115p;  
<http://home.hit.no/~hansha/>
- [7] Programming Arduino with LabVIEW : Marco Schwarttz, Oliver Manickum
- [8] Julian Ferrer-Rios, Kristen Heck, Francesca Ramadori, Kelvin Tang, CLAD Study Guide Prepared by LabVIEW Student Ambassadors,2015,37p;
- [9] Ahmed Okasha, Interfacing Labview with Arduino using LINX,2015,17p;
- [10] Hans-Petter Halvorsen , Data Acquisition in LabVIEW, 2016,53p;
- [11] Murtaza Saleem, Overview of Magnetron Sputtering System, presentation,43p;
- [12] L. O. Chua, IEEE Trans. Circuit Theory, CT-18, 507 (1971);
- [13] L. O. Chua and S. M. Kang, Proceedings of the IEEE, 64, 209 (1976);
- [14] E. Covi, S. Brivio, A. Serb, T. Prodromakis, M. Fanciulli and S. Spiga, "HfO<sub>2</sub>-based memristors for neuromorphic applications," *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*

## სამადლობელო

მადლობას ვუხდით მიკრო და ნანო ელექტრონიკის ინსტიტუტის თანამშრომლების ჩემდამი გულისხმიერი დამოკიდებულებისა და ყოველდღიური დახმარებისათვის, განსაუთრებით მინდა გამოვყო მეცნიერ თანამშრომლები ლარისა ჟანგიძე, რევაზ გულიაევი და უფროსი სპეციალისტები გივი სხილაძე და სერგო სიხარულიძე.