

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მანერებათა ფაკულტეტი

სადოქტორო პროგრამა: ფიზიკა

ზურაბ ყუშიტაშვილი

II სემესტრის დოქტორანტი

საკოლოქვიუმო ნაშრომი (კვლევითი კომპონენტი) თემაზე:

ნანოსისქის დიელექტრიკული ფირები

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ამირან ბიბილაშვილი
ფიზიკა – მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, ასოცირებული
პროფესორი, მიკროდა ნანოელექტრონიკის ინსტიტუტის
დირექტორი

სარჩევი

1. შესავალი 2
2. ლიტერატურული მიმოხილვა 2
3. პლაზმურიანოდირების კინეტიკა 3
4. პლაზმურიანოდირების მექანიზმი 7
5. ექსპერიმენტი 9
6. ექსპერიმენტული მეთოდები 11
7. სტიმულირებული პლაზმურიანოდირების მექანიზმი 12
8. დასკვნა 13
9. გამოყენებული ლიტერატურა 13

1. შესავალი

მიკროდანიანოელექტრონული ხელსაწყოების შექმნის ერთ-ერთ ძირითად ელემენტს წარმოადგენს დიელექტრიკი, რომლის ოპტიკური და ელექტრული თვისებები განსაზღვრავს მის ფართო გამოყენებას ინტეგრალური მიკროსქემების შექმნის ინდუსტრიაში.

დიელექტრიკული ფირების ფორმირების სტანდარტული ტექნოლოგია არის მაღალტემპერატურული (11000K) მაღალი ტემპერატურა კიურაციით და მხოლოდ ხელსაწყოების თვისებებზე. ასევე დანაშაურობს დიელექტრიკის მიღების ტემპერატურის შემცირება გადაწყვეტილებით ნახელსაწყოების დაზადებისას.

ამ პრობლემის გადასაჭრელად შემოღებულია დიელექტრიკების მიღების კატალიზური პლაზმური პლაზმური ნოდირების მეთოდი. ეს პროცესი არის დაბალტემპერატურული (300-4000K), მშრალი პროცესი და კარგად შეესაბამება ნახევარგამტარული ხელსაწყოების შექმნის ტექნოლოგიას. პლაზმური ნოდირების მიღებული დიელექტრიკული ფირები არ შეიცავს მინარევებს, ხასიათდება ინსაფენთან კარგად დგეობით, მაღალი გარღვევის ძაბვით და პლაზმის იონების განხედაპირის დაუზიანებლობით. ეს პარამეტრები კი განსაზღვრავს დიელექტრიკის ოპტიკურ და ელექტრულ თვისებებს.

2. ლიტერატურული მიმოხილვა

თანამედროვე ტექნოლოგიის მსოფლიოს მოწინავე ქვეყნებში ინტენსიურად მიმდინარეობს მიკროელექტრონიკის ნანოელექტრონიკაზე გადასვლის პროცესი [1].

ნანოელექტრონიკა მცნიერების და ტექნიკის სწრაფად მზარდი დარგია, რომელიც კვლევს და ქმნის, მოცულობის მიმართ ერთი მიმართულებით მანც, ნანოზომის სტრუქტურებს და ხელსაწყოებს.

ნანოელექტრონული ხელსაწყოები ედგება პოტენციალური ჯებირებისა და კვანტური ორმოებისაგან. ასეთი ელემენტის ენერგეტიკული სპექტრი დამოკიდებულია სტრუქტურის ზომაზე და ერთი ელექტრონის მასაზე დამატებას გამოკვლევას ებიოთა დცვლის ენერგეტიკულ სურათს.

ნანოზომის სტრუქტურებში მუხტის მატარებლის მოძრაობა, ძირითადად, განპირობებულია გვირგვინის დაბალი განზომილებებით და კვანტური იმეზლუდებით.

ასეთი ნანოელექტრონული ხელსაწყოების ერთ-ერთ ძირითად მუდგენელ ელემენტს წარმოადგენს დიელექტრიკი, რომლის მიმართ წყენებულია შემდეგი მკაცრი მოთხოვნები:

- უნდა იყოს ზეთხელი (5-50 ნმ);
- მასუნდაჰქონდეს დიდი გარღვევის ელექტრული ძაბვა;
- უნდა ხასიათდებოდეს დიდი დიელექტრიკული იმეზლუდობით;
- უნდა იყოს უდეფექტო, მინარევების გარეშე;
- არ უნდა იყოს ფორიანი
- მისი პარამეტრები გარე ფაქტორების მიმართ უნდა იყვნენ სტაბილური.

ნანოელექტრონული ხელსაწყოების დაზადებისათვის ქვესაფენის ძირითადი მასალა სილიციუმი [2], როგორც იაფი და კარგად შესწავლილი.

მათსაფუძველზე ხელსაწყოების დაზადების ძირითადი პროცესია მეტალ-ოქსიდ-

ნახევარგამტარული (მონ) სტრუქტურის ფორმირება.
 (ზეთხელდიელექტრიკულ ფირებს ეწოდება თოქსიდები). მონ-
 სტრუქტურა კარგი პარამეტრებით მიიღება მათხესაკუთარი თოქსიდების (ში-ზემი O2 თოქსიდი)
 ფორმირებით,
 რაც აიხსნება მათი მესერის პარამეტრების ერთმანეთთან კარგი თავსებადობით და შესაბამისად,
 თოქსიდ-ნახევარგამტარ გამყოფის აზღვრის სრულყოფით,
 მათხესხვაუცხო თოქსიდის არსებობასთან შედარებით.
 დიელექტრიკული ფირების ფორმირების სტანდარტული ტექნოლოგია, Si-
 ის ქვესაფენზე მაღალ ტემპერატურულია (1400K) [3].
 მაღალ ტემპერატურაზე ხდება დიელექტრიკში არასასურველი მინარევების დიფუზია,
 მისი ფორიანობის გაზრდა, ქვესაფენთან ადგილის გაუარესება დაა.შ.
 ამიტომ დიელექტრიკული ფირების მიმართ ზემოთ ჩამოთვლილი მიმართა დიფუზიის გარდა
 ლდება. ყოველი ვეცუდად მოქმედებს მის, დასაბოლოოდ, მასზე შექმნილ,
 განსაკუთრებით ნაწილის ხელსაწყოების პარამეტრებზე. მაშასადამე,
 არამხოლოდ დიელექტრიკის სახე,
 არამედ მისი მიღების ტექნოლოგიის ტემპერატურის შემცირება ცვადამწყვეტი ფაქტორია შესაბამის
 ინანოხელსაწყოს დამზადებისას.
 პლაზმური ანოდირების მეთოდის გამოყენება მეტალების და ნახევარგამტარების ზედაპირებზე,
 საშუალებას იძლევა შემცირდეს საკუთარი თოქსიდების ფორმირების ტემპერატურა. გარდა ამისა,
 პლაზმური ანოდირების პროცესი ადვილად კონტროლირდება, არის ვაკუუმური,
 ანუ „მშრალი“ მეთოდი, მიიღება მაღალხარისხიანი თოქსიდები, სტაბილური პარამეტრებით.
 ამ მეთოდის შერწყმა ხელსაწყოების მიღების სხვა ტექნოლოგიურ პროცესებთან იძლევა კრისტალზე
 (ჩიპზე) მაღალინტეგრაციას.
 მიუხედავად ასეთი დადებითი მხარეებისა,
 პლაზმური ანოდირების ტექნოლოგიას აქვს ნაკლოვანებანი, კერძოდ,
 ის ხასიათდება უაღრესად მცირე პროცესის ეფექტურობით და შესაბამისად თოქსიდის ფირის ფორმირ
 ების დაბალი სიჩქარით.
 ამის გამო პლაზმური ანოდირების ტექნოლოგია მვერჰპოვა გავრცელება ხელსაწყოების შექმნაში.

3. პლაზმური ანოდირების კინეტიკა

ნახევარგამტარების დათითქმის ყველა მეტალის ზედაპირები ჰაერზე ყოფნის დროს იჟანგებიან და წა
 რმოქმნიან საკუთარი თოქსიდის თხელ ფენას, რომლის სისქის ზრდასწრაფად წყდება.
 ამ ფენის შემდგომი ზრდისთვის საჭიროა, რომ ჟანგბადის ატომებმა ჩააღწიონ უფრო ღრმა ფენებში.
 ეს შეიძლება მოხდეს მესერში მათი დიფუზიით ან მოდებული გარე ელექტრული ველით.
 ორივე შემთხვევაში იმუშის გაცხელებით პროცესი დაჩქარდება.
 ელექტრული ველით და ჟანგის პროცესის ერთერთი მეთოდი აპლაზმური ანოდირება.
 ანოდირება ელექტროლიზის პროცესია. ელექტროლიტა და დებულია აირი,
 რომელშიც ჩაშვებულია ელექტროდები - ანოდი და კათოდი.
 მათზე გარკვეული სიდიდის ძაბვის მოდების შემდეგ ხდება აირის გარღვევა და მისი იონიზაცია რაც
 ანაპრობებს მასში იონური დენის გავლას.
 დასაჟანგ ზედაპირზე მოდებულია ანოდი თან შედარებით დადებითი ძაბვა,

რაზეცხდებაპლაზმიდანუარყოფითიიონებისდაელექტრონებისანოდირება.

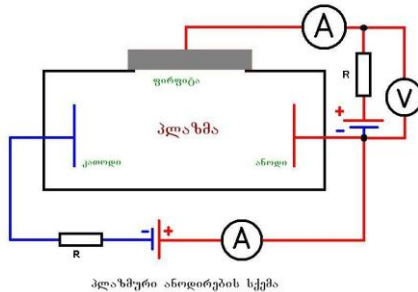
მისიპრინციპულისქემა:

ელექტროლიტურდაპლაზმურანოდირებასშორისყველაზედიდიგანსხვავებადენისეფექტურობისსიმცირეაუკანასკნელში.

ანოდირებისდენისმუდმივობისშემთხვევაშიეფექტურობაგანისაზღვრებაფორმულით:

$$\eta = \frac{6ADF\rho}{QM}$$

სადაცA- ჟანგისზედაპირისფართობია, D- ჟანგისსისქეF -ფარადეისრიცხვი (9.65E104 კალ./მოლი), ρ- ჟანგისიმკვრივე, Q- ჯამურიმუხტი, M - მოლექულურიმასა. ამგანტოლებიდანჩანსრომდენისეფექტურობადამოკიდებულიაპლაზმაშიიონებისკონცენტრაციაზე.



ნახ.1 პლაზმურიანოდირებისხელსაწყოსსქემა

არსებობსპლაზმისმილებისციკვათოდანიდაცხელკათოდანიმეთოდები.

ციკვათოდანიშემთხვევისდროსელექტროდებზემოდებულიმაღალიმაბვანიწვევსაირისიონიზაციასანუხდებაციკვათოდანიგაზგანმუხტვა.

ასეთპლაზმაშიგვაქვსიონებისენერგეტიკულისპექტრისფართოდაპაზონი.

მაღალიენერგისმქონეიონებიიწვევენნიმუშისზედაპირისგაფრქვევას, რაცარასასურველია.

ცხელკათოდანიშემთხვევის (ნახ.1)

დროსგვაქვსპლაზმისიონიზაციისმაღალიხარისხიდაკათოდზემაბვისმცირეფარდნა,რაცგანაპირობებსპლაზმაშიმაღალიენერგისმქონეიონებისარსებობასდაანოდირებისპროცესიმდინარეობსგაფრქვევისგარეშე.

ცხელკათოდანიპლაზმაშიმაიონიზებელიელექტრონებისრაოდენობადიდა,

რაცგანაპირობებსპლაზმისმაღალიიონიზაციისხარისხს.

ცხელკათოდანიმეთოდისნაკლიაჟანგბადშიკათოდისსწრაფიდაჟანგვა.

ანოდირებისჩატარებისრეჟიმებია:

- 1) გალვანოსტატიკური
- 2) პოტენციოსტატიკური
- 3) პოტენციოდინამიკური

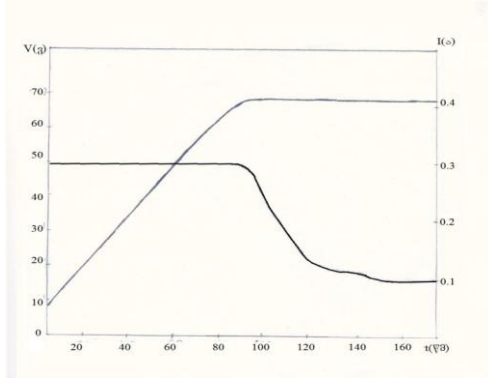
1) გალვანოსტატიკური რეჟიმისდროსმუდმივიაანოდირებისდენი (I=const).

ოქსიდისზრდასთანერთადიზრდებაამისიწინააღმდეგობა, რაციწვევსნიმუშზემაბვისზრდას (ნახ.2).

$U_a(t)$ ან

$U_a(Q)$ -

სრეგისტრაცია გვაძლევს ანოდირების პროცესის კინეტიკას რომელიც ფუნქციონალურად დაკავშირებულია ოქსიდის ზრდის რეალურ კინეტიკასთან $L(t)$ - ოქსიდის სისქის დამოკიდებულებას დროზე. ეს რეჟიმი ყველაზე მეტად გამოიყენება კვლევით პროცესებში, რადგან უზრუნველყოფს ოქსიდში ელექტრული დენის მუდმივობას და ოქსიდის ზრდის დროს იზრდება სტრუქტურული სრულყოფა (ნახ.2).



ნახ.2 პლაზმური ანოდირების საძაბვის და ფორმირების დენის კინეტიკა

2) პოტენციოსტატიკური რეჟიმის დროს მუდმივია ანოდირების ძაბვა $U_a = \text{const}$, ხოლო რეგისტრაცია ხდება ოქსიდის ზრდით გამოწვეული დენის ვარდნისა $I_a(t)$.

3) პოტენციოდინამიკურში კი ოქსიდის ზრდით გამოწვეული ძაბვა წრფივად იცვლება $U_a(t) = V_a(t)$.

$U_a(t)$ და $I_a(t)$ რეჟიმების რეგისტრაციები წარმოადგენს ჟანგის ფენის ზრდის შესწავლის არაპირდაპირ მეთოდებს,

რომლებიც გაცილებით მარტივებია ვიდრე უშუალოდ ოქსიდის სისქის დამოკიდებულებადროზე $L(t)$, განსაკუთრებით მაშინ როცა დაკვირვება ხდება პროცესის დროს.

დადგენილია, რომ ჟანგის ფენის ზრდა დამოკიდებულია ანოდირების სისტემის გეომეტრიაზე და ყოველთვის თანაბრად არ იცვლება ძაბვასთან ერთად. ფირფიტის ერთგვაროვანი და ჟანგისთვის ელექტროდების კონფიგურაცია ფირფიტის მიმართ უნდა იყოს ცილინდრულად სიმეტრიული.

და ჟანგის პროცესი წარმოადგენს ჟანგბადის იონების მიგრაციას ჟანგის ფენაში და იქმნება ჟანგის ახალი შრე.

ეს სპერიმენტული მონაცემები გვიჩვენებენ რომ, დამოკიდებულება და ჟანგის დენსა და ძაბვას შორის ექსპონენციალური ხასიათისაა და გამოისახება ფორმულით:

$$J_f = A e^{BE_f}$$

სადაც, J_f ჟანგის ფორმირების დენია, A და B მუდმივებია, E_f ნიმუშზე მოდებული ძაბვა. აქედან გამომდინარეობს წრფივი დამოკიდებულება:

$$\ln J_f(E_f)$$

ამ მრუდის დახრილობას

$$\frac{dE_f}{d \ln J_f}$$

ტაფელისკოეფიციენტიეწოდება.

ნიმუშიგამავალიელექტრულიდენიშედგებაელექტრულიდაიონურიწევრებისგან.

ჟანგისზრდადათვისებებიდამოკიდებულიაამდენებისფარდობაზე.

იონურიდენიშეიძლებაგამოვთვალოთფარადეისკანონიდან,

რომელსაცსილიციუმისდიოქსიდისთვისაქვსშემდეგისახე:

$$J_i = \frac{4\rho F}{M} * \frac{dD}{dt}$$

სადაც $\rho = 2.2$ გ/სმ³ ჟანგისსიმკვრივეა, $F = 9.65E4$ კ/მოლფარადეისრიცხვია, $M = 60$

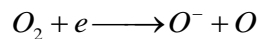
გ/მოლმოლურისიმკვრივეა. $\frac{dD}{dt}$ ანგსტრემი/მოლიანოდირებისსიჩქარეა.

არსებობსმოსაზებარომ, პლაზმაშიელექტრონებისკონცენტრაციისგაზრდისდროს, როცამათიენერგიამცირდება, ხდებაჟანგიელექტრონებისგამჭოლიგაჟონვისზრდა, რასაცმოყვებაანოდირებისსიჩქარისზრდა.

ამმოსაზრებისდასამტკიცებლადავტორებიმიუთითებენიმფაქტერომპლაზმასადანიმუშსშორის პოტენციალთასხვაობისშემცირებთმცირდებაელექტრონებისენერგიადაანოდირებისსიჩქარეციკლებს. ასევენავარაუდებიარომ,

პლაზმაშიოქსიდთანდაბალიენერგისმქონეუარყოფითიმუხტებსარმეუძლიათზედაპირამდემია ღწიონიაროდენობითრომოქსიდისფენაგაიზარდოს.

ჟანგბადისუარყოფითიიონებიწარმოიქმნებიანრეაქციით:



რომელთადისოციაციისენერგიაა 4.08 ევ.

ელექტრონებიამრეაქციისთვისსაჭიროენერგიასიძენენნიმუშზემოდებულიპოტენციალთასხვაობით.

ესრეჟიმიმოხერხებულიაკვლევითიპროცესებისდროსრადგან, უზრუნველყოფსნიმუშზემუდმივპოტენციალთასხვაობასდაოქსიდისზრდისდროსფაზათშორის საზღვარზეპირობებისმუდმივობას,

ესკიდილევასაშუალებასგამოვლინდესსხვადასხვაგარეფაქტორებითგამოწვეულიეფექტები.

$$I_f = \frac{U_f}{E\eta X t}$$

სადაც E - ველისდამაბულობაოქსიდში, η - დაჟანგვისდენისეფექტურობა, X - მუდმივამოცემულიოქსიდისთვის, t - დაჟანგვისდრო.

3) პოტენციოსტატიკური რეჟიმის დროს ოქსიდში ველის დამაბულობამ ცირდება, რასაც მოყვება ოქსიდში დენის შემცირება. დენის შემცირება იწვევს დამაბულობის ვარდნის სიჩქარის შემცირებას, რასაც მოყვება დენის ვარდნის სიჩქარის შემცირება და დენის მნიშვნელობა იმდენად მცირდება რომ ოქსიდის ფენის ზრდა პრაქტიკულად ჩერდება. ამ ფაქტის გათვალისწინებით შეგვიძლია დავწეროთ ამ რეჟიმისთვის მიახლოებული გამოსახულება:

$$\frac{1}{J_f} = const + (BU_f \kappa / D^2)t$$

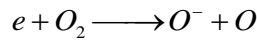
სადაც, $\kappa = \frac{1}{J_f} \frac{dD_f}{dt}$, B- მუდმივაა, D_f - ჟანგის სისქე.

ეს რეჟიმი ხასიათდება მეტი ხანგრძლივობით და ამავდროულად სისქის ნელი ზრდით და გაჭონვის დენები იმინიმალურია.

3) მესამე რეჟიმი 1) და 2) რეჟიმების კომბინაცია რომელიც ასევე კოულუმბის ფირების მიღებაში ფართო გამოყენებას. ამ მეთოდით მიღებული ფირების ხასიათდება სტრუქტურული უწყვეტობით და იზოლაციური კარგი მახასიათებლებით. ამ მეთოდის დროს ზედაპირული ზარები ვსება და ნარჩენი იონების კონცენტრაციის გრადიენტი იმინიმალურია. რაც, თავის მხრივ გავლენას ახდენს ჟანგის პოლარიზაციულ და იზოლაციურ თვისებებზე.

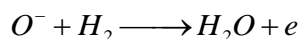
4. პლაზმური ანოდირების ფიზიკური მექანიზმები

როგორც ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, მღვივადი განმუხტვის დროს, მუდმივი დენის შემთხვევაში ჟანგის ფენების ზრდა ხდება მხოლოდ იმ შემთხვევებში, როცანიმუშხემოდებულია პლაზმასთან შედარებით და დებითი ძაბვა [3]. დღესდღეობით არასებობს პლაზმური ანოდირების ერთიანი მოდელი, რომელიც თუნდაც რაოდენობრივად ახსნიდა ყველა ექსპერიმენტულ მონაცემს. ასე მაგალითად დადგენილია რომ ანოდირების დროს იონური დენის ნიმუში იგავლით, და ჟანგვა ხდება ან იმუში-ჟანგის ზედაპირზე, ან ჟანგი-პლაზმის ზედაპირზე. ამათუი მსახის სახის და ჟანგვის პორცესის სიჩქარე განპირობებულია როგორც აქტივაციის ზღურბლური ენერგიების შედარებით, ასევე ოქსიდში მათი ძვრადობით. უარყოფითი იონების და ელექტრონების როლი ჯერ ბოლომდე არკვეულია არარის. მკვლევარების ერთი ჯგუფი იმიჩნევს რომ ელექტრონების არსებობა არასასურველია რადგან ისინი იწვევენ გაჭონვის დენებს და ამცირებენ ანოდირების პროცესის ეფექტურობას, ხოლო ჟანგბადის უარყოფითი იონები ურთიერთქმედებენ ოქსიდის მესერთან, პლაზმიდან ჩაიჭირებიან ჟანგის ზედაპირის მიერ. სხვა ჯგუფის აზრით, პლაზმაში ელექტრონების არსებობა ანოდირებისთვის აუცილებელია რადგან ჟანგბადის იონების წარმოქმნა ხდება ოქსიდის ზედაპირზე მუდმივი რეაქციით:

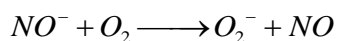
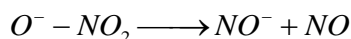


ამჰიპოთეზისასარგებლოდდგინდებარომოქსიდისზედაპირზერადგანაცარსებობსორმაგილექტრონულიშრე, ამიტომჟანგბადისუარყოფითიიონები, რომელთასითბურიენერგიებიარადემატებაელექტრონვოლტისრამდენიმენაწილს, არშეუძლიათზედაპირამდემიაღწიონიმრაოდენობითრომშექმნანოქსიდისახალიფენები. ზედაპირიერთგვარიბრტყელიიზოლირებულიიზონდივითიქცევადამასზეხვედებიანმხოლოდჟანგბადისდადებითიიონებიდასწრაფიელექტრონებიბოლცმანისგანაწილების “კუდიდან”. ორივეჰიპოთეზისშესამოწმებლადჩატარდამრავალიკვლევა. ზოგნაშრომში, ანოდურპოტენციალზემოდებულიაცვლადიძაბვა, რათამოხდესპლაზმიდანუარყოფითიიონებისდაელექტრონებისგამოცალკეება. მღვივადიგანმუხტვაპირველადჩატარდაალუმინიზეორსხვადასხვარეჟიმში. ერთიმოდებულიოყო 5ვ. ამპლიტუდისცვლადიძაბვა, მეორეში -5ვ. მუდმივიდამავესიდიისცვლადიძაბვებისსუპერპოზიცია. ამექსპერიმენტებისავტორებისაზრით, ცვლადისიგნალისშემთხვევაშიოქსიდისზედაპირზემაბვისდადებითახვეარპერიოდშიხდებოდ აუარყოფითიიონებისდაელექტრონებისანოდირება, ხოლომეორექსპერიმენტში, როცამოდებულიიყოორივემაბვისსუპერპოზიცია, ხდებოდაოქსიდისზედაპირზეუარყოფითიიონებისჩაჭედვარადგანმათიმასისგამოვერასწრებდნ ენმაბვისცვლადნაწილზეაყოლასდაგრძნობდნენმხოლოდუარყოფითმუდმივენაწილს, რომელიცგანიზიდავდამათზედაპირიდან. როგორცნახ.2-დანჩანს, პოტენციოსტატიკურრეჟიმშიდენისშემცირებითოქსიდისზრდაშესამჩნევისიჩქართხდებამხოლოდპირველშემთხვევაში, რაცავტორებისაზრითარისჟანგბადისუარყოფითიიონებისარსებობისაუცილებლობადაჟანგვისჩასატარებლად. ცვლადიდამუდმივიძაბვებისსუპერპოზიციისდროს, ოქსიდიდადებითიპოლარობისველისაერთოდარარის, რაცოქსიდისზრდისთვისარისაუცილებელი. მიუხედავადიმისათურომელიმექანიზმითაამიღებულიიონები, ელექტრულიველიარწარმოადგენსმასტიმულირებელფაქტორსდაექსპერიმენტიცვერადწევსასურველშედეგს. გარდაამისა, მეორეშემთხვევაში, ანუმაბვისსუპერპოზიციისდროს, ხდებანიმუშიდან O^- იონებისჩაკეტვა, ასევეპლაზმიდანელექტრულიდენისდიდინაწილისა. ოქსიდისზედაპირიმუშაობსერთგვარიზონდივიტროცამისზედაპირზეაღწევენმხოლოდდადებითიიონები. ამაზემოწმობსპროცესისდასაწყისშივეანოდურიდენისსიმცირე, როცაჟანგისსისქეჯერკიდევუმნიშვნელოა. ამავეექსპერიმენტისავტორებმამოგვიანებითგანაცხადესთავისშრომებშიშეცვლილიმოსაზრებადადაასკვნესრეაქციისწამყვანროლზედაელექტრონებისმონაწილეობისაუცილებლობაზეოქსიდისფორმირებაში. მორუზმადასხვამკვლევარებმა [3] გამოიკვლიესჟანგბადისუარყოფითიიონებისროლიანოდირებისპროცესში. ერთშემთხვევაში, ანოდირებისპროცესშიშეურიესწყალბადი, მეორეშიაზოტოსჟანგი NO_2 .

წყალბადისშერვისდროსხდებამედგირეაქცია:



რომლითაც ქანგბადის იონების კონცენტრაცია შემცირდა.
 იგივე შედეგი მოჰყვება ზოტის ქანგბადის ურთიერთქმედების დროს:



ორივე შემთხვევაში ქანგის ზრდის სიჩქარე მცირდება, რაც ჩათვალეს O^- ისწამყვან როლზე,

რომლებიც წარმოქმნიან პლაზმიდან ქანგის ზედაპირზე რაექციით. გარდა იმექსპერიმენტებისა, რომლებშიც ხდება გაზის შემადგენლობის ვარირება,

ასევე შეიწავლებოდა ოქსიდის სიჩქარის ზრდის სიჩქარის და O^- იონების კონცენტრაციის დამოკიდებულება ანოდური დენის სიმკვრივეზე.

აღმოჩნდა რომ ქანგბადის დაბალწნეებზე (0.1 მმ. ვწყ. სვ), გვაქვს O^- იონების ანოდირების სიჩქარეს შორის წრფივი დამოკიდებულება. წნევის გაზრდით (1 მმ. ვწყ. სვ)-მდე, 3-ჯერ შემცირდა ქანგის ზრდის სიჩქარე, თუმცა ურყოფითი იონების კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად არ შეცვლილა.

ასეთმა შედეგმა განაპირობა იმის ვარაუდით, რომ იონების წარმოქმნასთან ერთად შეიძლება არსებობდეს ისეთი მექანიზმებიც, რომლებიც ახდენენ პლაზმაში არსებული ელექტრონების დისოციაციას ადსორბირებულ ქანგბადის მოლეკულებთან. ასევე ჩატარდა ექსპერიმენტები,

რომლებშიც მუდმივი ელექტრული ველთან ერთად მოდებული იყო მაგნიტური ველი, რომელსაც უნდა მოეცა ელექტრონების ან იონების ანორივესერთა და დარჩევის შესაძლებლობა.

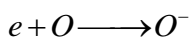
რაც ქაოსურად მოძრაობის წილაკების თვისებრივი ციკლად მიუსადაგებელია.

თუმცა ელექტრონების როლის სასარგებლოდ, არსებობს ექსპერიმენტული მონაცემები, რომლებშიც ნიმუშის პარალელურად მოდებული იყო მაგნიტური ველი,

რითაც ხდებოდა ელექტრონების ნაკადის გადაწვევანი მუშთან კონტაქტის განდამის გამო ანოდირების სპროცესის წრაფად მცირდებოდა.

ამ ფაქტების გათვალისწინებით, მიზანშეწონილია ვივარაუდოთ რომ, ანოდირების დროს პლაზმაში არსებული ელექტრონების წვლილი მნიშვნელოვანია.

ისინი გადალახა ვენა ქანგის ზედაპირთან ორმაგ ელექტრონულ შრეს, ზედაპირთან მიღწეულ უბანში ელექტრონების ანოდირების დადსორბირებულ მოლეკულებს რეაქციით ან ურთიერთქმედებენ მისატომებთან:



რომლის შედეგად აცფირფიტის ზედაპირზე წარმოქმნება ქანგბადის უარყოფითი იონები, რომლებიც გარე ელექტრული ველით ჩადაინქანგის ფენებში.

ელექტრონების ენერგია უნდა იყოს ოპტიმალური,

რათამაქსიმალურიალბათობითმოხდესრეაქციები.
 ამენერგისგარკვეულმნიშვნელობაზეგადაჭარბებითკომილბულიჟანგისხარისხიფუჭდება.

5. ექსპერიმენტი

მეტალებისთერმულიანმაგნეტრონულიდაფენა. აღნიშნულექსპერიმენტებშისაფენადგამოყენებულ
 ილიყოSi-ისნიმუშები,
 რომელიცშუალოდექსპერიმენტისწინქიმიურადსუფთავდებოდადავაკუუმურიდაფენისტექნი
 კისგამოყენებითმასზეფენებოდამეტალები.

ექსპერიმენტშიგამოყენებულიყომეტალებიTiდაTa.

ელექტრონულ-სხივურიდაფენა.

მეტალებისდაფენისშემდეგმიღებულსტრუქტურებზეფენებოდაიშვიათმიწათალითონი Y
 (იტრიუმი). მიღებულისტრუქტურებისSi-Y, Si-Ti-Y დაSi-Ta-Y-ის

(ნახ.3).პლაზმურიანოდირებახდებოდავაკუუმურდანადგარში,

რომლისსქემატურინახაზიდაფოტოსურათიმოცემულიანახ.5-ზე.

სილიციუმზემიღებულისტრუქტურათავსდებოდასპეციალურდამჭერზე,

რომლისტემპერატურაივცლებოდა 473-750K ტემპერატურულდიაპაზონში.

ნიმუშიცხელდებოდაპალოგენურინათურებისკომპლექსით KF500 ტიპისნათურებით (9). ანოდი

(2) დაკათოდი (3) მოთავსებულიყომეტალისაგანდამზადებულპლაზმისდამჭერში (6)

რომელსაცგააჩნდახვრელიიმისათვისრომ,

პლაზმაშეხებოდანიმუშისზედაპირსამუშაომოცულობაში, ხუფის (1) ქვეშ,

მექანიკურიდადიფუზიურიტუმბოებისსაშუალებითიქმნებოდავაკუუმი 10⁻⁶მმ.ვწყ.სვ.

რომელშიცშემდეგხდებოდაჟანგბადისდაარგონისგაზებისნერევის (3:1)

შეშვებადაწნევადადიოდა 10⁻²მმ.ვწყ.სვ-მდე. ანოდსადაკათოდსშორისედებოდა 150-

200ვსიდიდისძაბვადახდებოდაშეყვანილგაზშიპლაზმისანთება,

რისშედეგადაცმიღებოდაჟანგბადშემცველიმღვივარიპლაზმურიგანმუხტვა.

პლაზმურიანოდირებახდებოდამაშინ,

როდესაცნიმუშზეედებოდაპლაზმისმიმართდადებითიპოტენციალი.

ანოდირებისპროცესიმიდინარეობდაგალვანოსტატიკურრეჟიმშიანუსიმკვრივისდენისპირობებ
 ში.

ნიმუშიგამავალიფორმირებისდენიდანნიმუშზემოდებულიმზარდიპოტენციალისმნიშვნელობე
 ბიფიქსირდებოდაამპერმეტრით M 1107 დავოლტმეტრით M 1106.

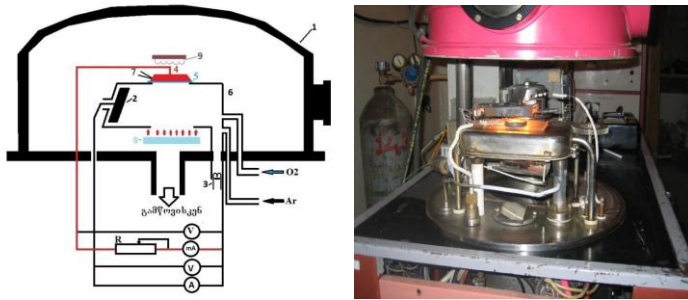
კვებისწყაროდანნიმუშზეკათოდისმიმართედებოდადადებითიპოტენციალი.



ნახ.3 Si-Ti(Ta)სტრუქტურა



ნახ.4 Si-Ti(Ta)-Y სტრუქტურა



ნახ.5 პლაზმურიანოდირების სქემა ტურინახაზი და ფოტოსურათი

- 1-ხუფი;
- 2-ანოდი;
- 3-კათოდი;
- 4-სამიზნის კონტაქტი;
- 5-ნიმუში;
- 6-პლაზმის დამჭერი;
- 7-თერმოწყვილის გამომყვანები;
- 8-ულტრაიისფერი და სხივების წყარო;
- 9-ნიმუშის გამახურებელი.

პროცესის დამთავრების შემდეგ, კატალიზატორი (Y_2O_3)
 ქიმიურად იხსნება და კონცენტრირებული პლაზმაში ითავის ტემპერატურაზე 3
 წუთის განმავლობაში იხსნება, რომარზიანდებოდასილიციუმის,
 სილიციუმის საკუთარი ოქსიდი და არცალუმინის ოქსიდი.

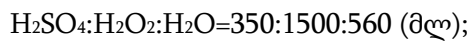
6. ექსპერიმენტული მეთოდიკა

ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო სილიციუმის ფირფიტა ტიპის გამტარებლობის ხვედრითი წინააღმდეგობით 4.5 ომი-სმ და 0.3 ომი-სმ. ყველა ფირფიტას ჰქონდა (100) ზედაპირული ორიენტაცია და იყენებდნენ დამუშავებულ ლეხ 14 კლასის სისუფთავით. ოქსიდური ფირფიტის გაზრდამდე ტარდებოდა სტანდარტული ქიმიური დამუშავება, რადგან ფირფიტის ზედაპირზე, გაუწყვილებელი ქიმიური ბმის გამო,

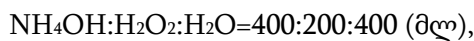
ყოველთვის არსებობენ ატმოსფეროდან მოხვედრილი ცხიმოვანი ზეთები და სხვადასხვა ქიმიური ლემენტები, რომლებიც მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ „საკუთარი ჟანგის“ განცხიმვაში. ამასთანავე, რომელიც მლის ცხიმის მოლეკულებს, მაგრამ არ ხდენს გავლენას და ამ უშვებელ ფირფიტაზე ხსნარში გადადიან და მლის რეაქციის პროდუქტები, რის შედეგადაც უკუ რეაქცია არ ხდება. როგორც ერთერთი მაგალითი, განცხიმვისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნას ჯვეულებრივი სარეცხი ფხვნილი პირველადი დამუშავებისთვის. შემდგომი განცხიმვის მიზნით საჭირო ატოლოლოში დუდილი 5 წუთის განმავლობაში. გარეცხვა გამდინარე დეიონიზირებულ წყალში 15 წუთი და ცენტრიფუგაზე გამშრობა.

ფირფიტის ზედაპირიდან არასასურველი, უკონტროლო „საკუთარი ჟანგის“ მოწამვლა ხდება არამდენიმე სტადიით:

I სტადია - მოწამვლა 5 წუთის განმავლობაში ქიმიურ ნარევეში:



II სტადია – მოწამვლა ნარევეში:



10 წუთის განმავლობაში და დეიონიზირებულ გამდინარე წყალში გარეცხვა 15 წუთი და ცენტრიფუგაზე გამშრობა;

III სტადია – 100% HF-ში 2 წუთის განმავლობაში მოწამვლა, დეიონიზირებულ წყალში გარეცხვა 15 წუთის განმავლობაში და ცენტრიფუგაზე გამშრობა.

ზედაპირზე „საკუთარი ჟანგის“ მოწამვლის სიჩქარე დამოკიდებულია მჟავათა კონცენტრაციაზე, მათი შეზღუდვის ინტენსიობაზე და ნარევის ტემპერატურაზე.

ეს პროცესები ფართოდ გამოიყენებან ხე ვარგამ ტარული ხელსაწყოების და ინტეგრალური სქემების დამზადების ტექნოლოგიაში. ქიმიური დამუშავების შემდეგ სილიციუმის ქვესაფენის ზედაპირები ვიზუალურად კონტროლირდებიან და ოპტიკურ მიკროსკოპ „Leitz“-ზე.

სილიციუმზე ოქსიდური ფირფიტების მიღებისათვის,

ზემოთ აღნიშნული ტექნოლოგიით დამუშავებულ ზედაპირებზე ვაკუუმში ეფინებოდა ტიტანის ატანტალის თხელი ფენის სისქით 30-40 ნმ.

დაფენა ხდებოდა ვაკუუმური თერმულიაორთქლების მეთოდით 10⁻⁶ მმ. ვწყ. სვ 373K

ტემპერატურაზე. ამავებრობებში ეფინებოდა სისქით დაახლოებით 15-20

ნმ იშვიათი ნიჭათამეტალი -

ყელექტროსხივური მეთოდით. განცხიმვის მიზნით აცეტონში დუდილი 3 წუთის განმავლობაში, შემდეგ გარეცხვა გამდინარე წყალში 10 წთ, დეკოპირება $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:150) 20 წამის განმავლობაში, 5

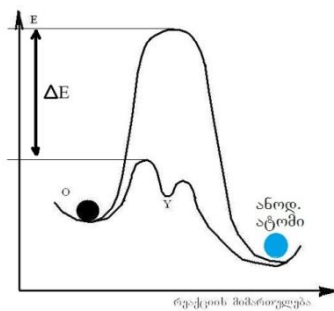
წუთის განმავლობაში გარეცხვა გამდინარე წყალში და გამშრობა ცენტრიფუგაზე.

სილიციუმის ქვესაფენზე ოქსიდური ფირფიტის ფორმირების შემდეგ კატალიზატორი ტრიუმის მოწამვლა ხდებოდა $\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ (1:1) 30-40 წამის განმავლობაში, გარეცხვა გამდინარე გამდინარე წყალში 5 წუთის განმავლობაში და ცენტრიფუგაზე გამშრობა.

7. სტიმულირებული პლაზმურიანოდირების მექანიზმი

სტიმულირებული პლაზმურიანოდირების მექანიზმის შემუშავებისთვის უნდა იქნეს გათვალისწინებული ის პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობენ პლაზმაში, დასაქანგმისა და სხვადასხვა პირობებში, ოქსიდში და გამყოფ საზღვარზე ოქსიდ-ნახევარგამტარი.

კატალიზური პლაზმურიანოდირებისას არ დაიშინება პლაზმაში და ბალენერგეტიკული უარყოფითი იონების არე, რაც იყო შემჩნეული კატალიზის გარეშე [3]. კატალიზატორს იტრიუმს, როგორც დანარჩენი იონებისა და იონთა ელემენტებს, აქვთ შეუვსებელი დეფორბიტალები, ითვლებიან სუპერიონურ გამტარებად და უატარებენ მხოლოდ დენის იონურ ნაწილს [2], მათ ოქსიდში ჟანგბადის იონის დიფუზიამეტი ავიდრე დასაქანგმისა და [8,9] და ელექტრო უარყოფითობა აქვთ უფრო ნაკლები [11], ვიდრე დასაქანგმისა და. აქედან გამომდინარე, იტრიუმის იონების ჟანგბადს, დენის ელექტრულ ნაწილს ჩაიჭერენ შეუვსებელი ორბიტალები, სადაც ისინი ხდებიან ნაკლებად მგრადები [12]. ელექტრო უარყოფითობის სხვაობის გამო, დასაქანგმისა და ართმეც მას ჟანგბადს, რომელსაც კატალიზატორი კვლავ ადგენს პლაზმიდან. ამრიგად კატალიზატორი გამოდის ჟანგბადის წაფიმიძწოდებლის როლში მასალისთვის, ანუ ხდება ჟანგბადი-დასაქანგმისა და სხვა იონის შემცირებას იდით. ეს ეფექტის ქემატურად გამოსახულია ნახ.6-ზე



ნახ.6 იტრიუმის გამოყენებით, ჟანგბადისთვის პოტენციალური ბარიერის შემცირება

8. დასკვნა

შემუშავებულია დაბალტემპერატურული სტიმულირებული პლაზმურიანოდირების პროცესის მექანიზმი, რომელიც ეყრდნობა კატალიზატორის შეუვსებელში გაშრეების თავისებურებას და მის ელექტრო უარყოფითობის დაბალ მნიშვნელობას, ელექტრონების გადაყვანას და მკავშირეებელი ზონიდან ანტიდამაკავშირებელ ზონაში. ნაჩვენებია, რომ შემუშავებული ტექნოლოგია და ამ ტექნოლოგიით მიღებული ოქსიდური ფირები შეიძლება იქნას გამოყენებული ნაოქსიდურ ტექნოლოგიაში.

9. გამოყენებული ლიტერატურა

1. ა.ბიბილაშვილი „ნანოტექნოლოგია დაახალიმასალები“, თსუ, 2011, 188გვ.;
2. ა.ბიბილაშვილი „ნახევარგამტარული მიკროელექტრონიკა“, თსუ, 2010, 416გვ.;
3. В.П.Пархутик, В.А.Лабунов. Плазменное анодирование (физика, техника, применение в микроэлектронике), Минск, „ физика и техника “, 1990, 280стр.;
4. Masaru Kuno, Introductory Nanoscience, Taylor and Francis group. 2012, pg-s 450;
5. М. Croset, G. Valesco. Патент Франции № 7727470 H01L 21/00 (1976);
6. J. Perriere, J. Siejka, S. Rigo, Corros sci., 20(1), 91 (1980);
7. S. Gourrier, J. B. Theeten, Appl. Phys. Lett., 38(1), 33 (1981);
8. J. Zhang, I. Bowi Appl. Phys. Lett., 71, 2964 (1997);
9. Y. Jin, K. Chang, Phys. Rev. Lett., 86, 1793 (2001);
10. Л.И. Миркин «Справочник по рентгеноструктурному анализу», М., 1968;
11. А.П. Бибилашвили, А.Б. Герасимов. Механизм низкотемпературных стимулированных процессов плазменного анодирования металлов и полупроводников, «Физика и техника полупроводников», 38, вып. 11, 1304;
12. А. Н. Кочарян, Д. И. Хомский Ж урн. ВРХО им. Д. И. Менделеева, т. XXVI, 39 (1981).