

25.06.2013

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მაცნეებათა ფაკულტეტი

სადოქტორო პროგრამა: ფიზიკა

ზურაბ ყუშიტაშვილი

II სემესტრის დოქტორანტი

სასემინარო ნაშრომი (სასწავლო კომპონენტი) თემაზე:

ფოტოლიტოგრაფია

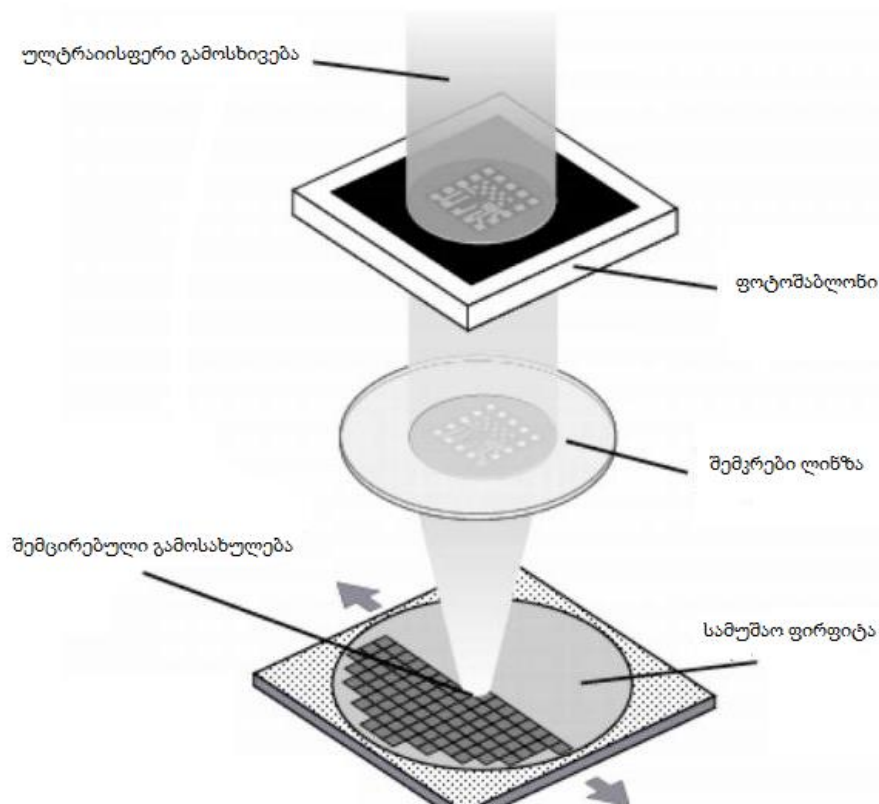
სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ამირან ბიბილაშვილი
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი,
მოკრო და ნანოელექტრონიკის ინსტიტუტის დირექტორი

1. შესავალი
2. ფოტოლიტოგრაფიის საფეხურები
 - 2.1 ზედაპირის გასუფთავება
 - 2.2 ფირფიტის მომზადება
 - 2.3 ფოტორეზისტის გამოყენება
 - 2.4 ექსპოზიცია და გამჟღავნება
 - 2.5 მოწამვლა
 - 2.6 ფოტორეზისტის მოცილება
 - 2.7 ფოტოშაბლონი
 - 2.8 რეზოლუცია
 - 2.9 სინათლის წყაროები
3. დასკვნა
4. გამოყენებული ლიტერატურა
5. ფოტომასალა

ფოტოლიტოგრაფია

1. შესავალი

ფოტოლიტოგრაფია, ანუ ე.წ. ოპტიკური ლიტოგრაფია ან ულტრაიისფერი (უი) ლიტოგრაფია, არის პროცესი, რომელიც გამოიყენება მიკროფაბრიკაციაში გარკვეული სურათის გადასატანად თხელი ან მოცულობითი ფირებების ზედაპირზე. ამ პროცესში გამოიყენება სინათლე იმისათვის, რომ სურათი გადატანილ იქნეს ფოტოშაბლონიდან სპეციალურ სინათლის მგრძობიარე ქიმიურ ნივთიერებაზე - ფოტორეზისტზე, რომელიც დაფენილია ნიმუშზე (სურ.1). შემდგომი ექსპონირებით, ქიმიური დამუშავებით და სასურველი მასალის დაფენით შესაძლებელია ფოტორეზისტის ქვეშ მიღებულ იქნას ფოტოშაბლონის შესაბამისი სურათი. მაგალითად, თანამედროვე კომპლექსური ინტეგრირებული სქემების წარმოებაში გამოიყენება ფოტოლიტოგრაფია, რომელიც მოიცავს 50 ციკლს.



სურ.1

ფოტოლიტოგრაფია ახლოს არის ფოტოგრაფიის ფუნდამენტურ პრინციპებთან იმით, რომ სურათი მიიღება ფოტორეზისტზე სინანათლის მოქმედების შედეგად და შემდეგ გამჟღავნებით (ფოტორეზისტის ქიმიური მოწამვლა). სინათლე შეიძლება მოხვდეს ფოტორეზისტზე

ფოტომაზლონის გავლით ან მის გარეშე. პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს ფოტომაზლონის გარეშე ახასიათებს დიდი სიზუსტე, ფორმის სიმკვეთრე და მაღალი გარჩევისუნარიანობა. ის უზრუნველყოფს ზუსტ კონტროლს სურათის ფორმასა და ზომას მთელ ზედაპირზე. მაგრამ, მას გააჩნია ერთი ნაკლოვანი მხარე: მას შეუძლია დაამუშაოს ბრტყელი ზედაპირები და მოითხოვს ექსტრემალურად სუფთა პირობებს.

2. ფოტოლიტოგრაფიის საფეხურები.

2.1 ზედაპირის გასუფთავება

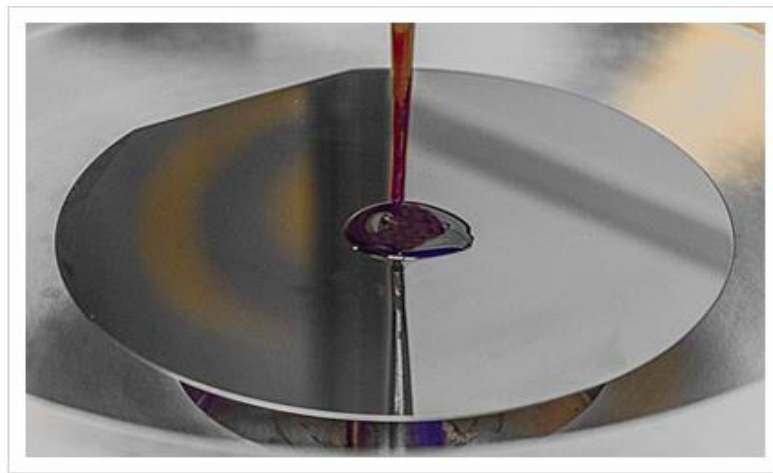
თუ ზედაპირზე არის ორგანული ან არაორგანული ნაერთები, ისინი უნდა მოიხსნას ქიმიური დამუშავებით. მაგალითად ხსნარებში, რომლებიც შეიცავენ წყალბადის პეროქსიდს

2.2 ფირფიტის მომზადება

საწყის ეტაპზე ფირფიტა უნდა გაცხელდეს გარკვეულ ტემპერატურამდე იმისათვის, რომ ზედაპირიდან მოხდეს ტენის მოცილება. ფირფიტები, რომლებიც დიდი ხნის განმავლობაში ინახებოდა საჭიროა მათი ქიმიური დამუშავება, რათა ზედაპირიდან მოიხსნას ყოველგვარი დაბინძურება.

2.3 ფოტორეზისტის გამოყენება

ფირფიტაზე ეფინება ფოტორეზისტი ცენტიფუგის საშუალებით (სურ.2). ფოტორეზისტი არის ბლანტი, თხევადი სითხე, რომელიც ეწვეთება მაღალი სიჩქარით მბრუნავ ფირფიტაზე და იშლება მთელ მის ზედაპირზე ერთგვაროვანი ფენის სახით. ფირფიტა ბრუნავს 1200-4800 ბრ/წთ სიჩქარით 30-60 წამის განმავლობაში. ამ დროს მიღებული ფოტორეზისტის სიქეებია 0.5-2.5მკმ.



სურ.2

მბრუნავი სისტემის გამო მიიღება ერთგვაროვანი სისქის ფოტორეზისტი 5-10მ სიზუსტით. ასეთი ერთგვაროვნება აიხსნება იმით, რომ ფოტორეზისტის ქვედა ფენები უფრო ნელა მოძრაობენ, ვიდრე ზედა ფენები. ამიტომ ზედა ფენების სწრაფი მოძრაობის გამო ზედმეტი ნაწილები წყდება ფირფიტას, ქვედა ფენები კი უფრო მჭიდროდ არიან შეწყებულნი ფირფიტას და ნეილი მოძრაობის გამო რადიალური მიმართულებით ქმნიან საკმაოდ ერთგვაროვან ბრტყელ ზედაპირს. საბოლოო სისქე განისაზღვრება ფოტორეზისტიდან ხსნარის აორთქლებით. ბოლო პროცედურა ფოტორეზისტის დაფენისა არის მისი გამოწვა 90-100°C ტემპერატურაზე 30-60 წამის განმავლობაში ბრტყელი ზედაპირის მქონე გამახურებელზე.

2.4 ექსპოზიცია და გამჟღავნება

ფოტორეზისტის გამოშრობის შემდეგ ხდება ექსპოზიცია ანუ დასხივება. დასხივდება ის არეები რომელიც შეესაბამება ფოტოშაბლონს. დასხივებული არეების ქიმიური თვისებები იცვლება, რაც იმას ნიშნავს, რომ სპეციალურ ხსნარში, გამამჟღავნებელში, მოთავსების შემდეგ ეს არეები იხსნება ხსნარში და რჩება დაუსხივებელი ფოტორეზისტი. არსებობს ფოტორეზისტის ორი სახეობა: პოზიტიური და ნეგატიური. პოზიტიური რეზისტის შემთხვევაში ხდება დასხივებული არეების გამჟღავნება, რადგან ქიმიურად არამდგრადი ხდება, ხოლო ნეგატიურის შემთხვევაში დასხივებული არეები ქიმიურად მდგრადი ხდება და სხვა გამამჟღავნებელში იხსნება დაუსხივებელი ფოტორეზისტის არეები. არსებობენ ფოტორეზისტები, რომლებიც გასხივების რეჟიმების, ტემპერატურის და გამოშრობის დროის მიხედვით იქცევიან, როგორც პოზიტიურ, ისე ნეგატიურ ფოტორეზისტებად.

გამამჟღავნებელი (სურ.3) ჩვეულებრივ შეიცავს ნატრიუმის ჰიდროქსიდს (NaOH), მაგრამ როგორც კვლევებმა აჩვენა ნატრიუმი არასასურველი ნივთიერებაა ველის ტრანზისტორების წარმოებაში გამოსაყენებლად. იგი დეგრადაციას უკეთებს დიელექტრიკის თვისებებს, მიგრირებენ დიელექტრიკში და ამცირებენ გარღვევის ძაბვის მნიშვნელობას, რაც ესოდენ მნიშვნელოვანია ველის ტრანზისტორების ფორმირებისას. ამიტომ ამჟამად იყენებენ ტეტრაეტელამონიუმის ჰიდროქსიდს, რომელიც თავისუფალია მეტალური იონებისგან.



სურ.3

გამჟღავნების შემდეგ ხდება რეზისტის ძლიერი გამოშრობა 120–180°C ტემპერატურაზე 20–30 წუთის განმავლობაში. ამ ეტაპის მიზანია რეზისტის საკმაოდ გამოშრობა და გამაგრება, რათა გაუძლოს ხანგრძლივ ქიმიურ დამუშავებას, იონების იმპლანტაციას, პლაზმურ დამუშავებას.

2.5 მოწამვლა

მოწამვლა არსებობს ორი სახის: სველი ანუ ქიმიური და მშრალი ანუ პლაზმური მოწამვლა. ქიმიური რეაგენტი ნიმუშს მოაცილებს ზედა ფენებს, რომლებიც არ არიან დაცულნი ფოტორეზისტის მიერ.

ნახევარგამტარულ წარმოებაში ფართოდ არის გავრცელებული მშრალი მოწამვლა. მოწამვლის სახე გამოირჩევა ანიზოტროპულობით, რაც ხელს უწყობს არსასურველი ადგილების მოწამვლას და მხოლოდ ერთი მიმართულებით ხდება მოწამვლა. ამ დროს სისქის კონტროლი შესაძლებელია დიდი სიზუსტით. სველი მოწამვლა უმთავრესად იზოტროპულია.

2.6 ფოტორეზისტის მოცილება

შემდგომი პროცესების განმავლობაში რეზისტი აღარ არის საჭირო, ამიტომ ის უნდა მოიხსნას ნიმუშის ზედაპირიდან. შესაძლებელია ქიმიურად ხსნარში მოწამვლით ან პლაზმურად. პლაზმა უნდა შეიცავს ჟანგბადის ატომებს, რადგან ისინი ჟანგავს რეზისტს და მიიღება მფრინავი ნაერთი, რომელიც ტავის მხრივ ვაკუუმური ტუმბოს მიერ გამოიქაჩება კამერიდან.

2.7 ფოტომაზბლონი

სურათი, რომელიც დაიხატება ფოტომაზბლონზე(სურ.4), იქმნება კომპიუტერული პროგრამით. შემდეგ ეს სურათი მრავლდება და გადაიტანება კვრცის ფირფიტაზე, რომელიც დაფარულია ქრომით. სანამ სურათის გადატანა მოხდება, ფოტომაზბლონი დაფარული ქრომით იფარება ფოტორეზისტით.



სურ.4 ფოტომაზბლონი

ექსპოზიციის დროს, რომელიც ხორციელდება ან ლაზერით ან ელექტრონებით, დამუშავდება ფოტორეზისტის ის უბნები, რომლებიც იყო დახატული კომპიუტერში. შედეგად, დასხივებული რეზისტის გამღავნების შემდეგ იწამლება ქრომი და რჩება გამჭვირვალე კვარცის უბნები, რომლებშიც შემდგომ გაივლის სინათლის სხივი.

2.8 რეზოლუცია

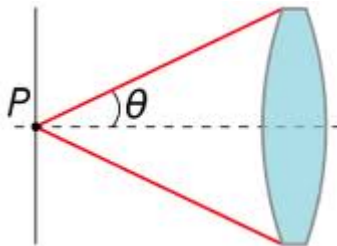
სუფთა სურათის პროექციის შესაძლებლობები მცირე მასშტაბებში შეზღუდულია სინათლის ტალღის სიგრძეებით, რომლებიც გამოიყენება ფოტოლიტოგრაფიაში. ასევე შეზღუდულია მაფოკუსირებელი ლინზის შესაძლებლობებიც. თანამედროვე ფოტოლიტოგრაფიაში გამოიყენება ღრმა ულტრაიისფერი გამოსხივება, რომელსაც იძლევა ე.წ. ექსიმირული ლაზერი ტალღის სიგრძეებით 248–193 ნმ. ეს გამოსხივება საშუალებას იძლევა მივიღოთ 50ნმ სიდიდის გამოსახულება.

გამოსახულების მინიმალური ზომა, რომელსაც იძლევა მაპროექცირებელი სისტემა გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$CD = k_1 \lambda / NA$$

სადაც, **CD** არის გამოსახულების მინიმალური ზომა (critical dimension), k_1 – პროცესთან დაკავშირებული კოეფიციენტი, რომელიც ყოველთვის 0,4-ის ტოლია, λ – სინათლის ტალღის სიგრძე, რომელიც გამოიყენებალიტოგრაფიაში, **NA** – ლინზის მახასიათებელი სიდიდე, რომელიც დამოკიდებულია ლინზიდან სინათლის გაშლის კუთხეზე და განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$NA = n \times \sin \theta$$



n - ლინზის დარდატეხის მაჩვენებელი, θ – სფერული კუთხე.

როგორც ფორმულებიდან ჩანს, რაც უფრო მცირეა ტალღის სიგრძე, მით უფრო მცირე ზომის გამოსახულების მიღებაა შესაძლებელი.

2.9 სინათლის წყაროები

ისტორიულად, ფოტოლიტოგრაფია იყენებდა ულტრაიისფერ სინათლეს, რომელიც მიიღებოდა გაზის განმუხტვის ნათურებში ვერცხლისწყლის გამოყენებით, ზოგჯერ კი კეთილშობილურ აირებთან ერთად, როგორცაა ქსენონი. ეს ნათურები იძლეოდა ულტრაიისფერი გამოსხივების სპექტრის რამდენიმე მკვეთრ პიკს ულტრაიისფერ დიაპაზონში. ამ სპექტრის გაფილტვრის შემდეგ შეირჩეოდა ერთ სპექტრალური ხაზი. 1960 – 1980 წლებში Hg-ის ნათურები გამოყენებული იყო ლიტოგრაფიაში მათი სპექტრალური ხაზებით 436ნმ, 405ნმ და 365ნმ თუმცა, ნახევრადგამტარული ინდუსტრიის საჭიროებიდან გამომდინარე აუცილებელი გახდა უფრო მაღალი გარჩევადობა (მაღალი ინტეგრაცია და სწრაფქმედება) და დაბალი საწარმოო ხარჯები. ამ მოთხოვნებს კი აღნიშნული ნათურები ვეღარ აკმაყოფილებდნენ.

ამ ტექნოლოგიურ გამოწვევებს პასუხი გასცა 1982 წელს შემოთავაზებულმა ახალი ტიპის სინათლის წყარომ ე.წ. ექსიმერულმა ლაზერებმა, რომლის პრეზენტაციაც შედგა IBM-ის კორპორაციაში კანტი ჯეინის მიერ. თანამედროვე ეპოქაში ექსიმერული ლაზერული ლიტოგრაფიის დანადგარებს იყენებენ მიკროელექტრონული ხელსაწყოების წარმოებისათვის. ტექნოლოგიური ხელსაწყოების ფენომენალური განვითარების წყალობით გასული ორი ათეული წლის განმავლობაში ექსიმერული ლაზერული ლიტოგრაფია ერთ-ერთი მნიშვნელოვან ფაქტორად იქცა მცირე ზომის გამოსახულების ფორმირების საქმეში. 1990 – 2010 წლებში ზომები შემცირდა 0,5მკმ-დან 45ნმ-მდე. ეს ტენდენცია გრძელდება და გამოსახულების ზომა მიაღწევს 10ნმ-ს.

ლიტოგრაფიის სისტემებში საყოველთაოდ გამოყენებული ღრმა ულტრაიისფერი ექსიმერული ლაზერები არის კრიპტონის ფლუორიდი – 248ნმ და არგონის ფლუორიდი – 193ნმ ტალღის სიგრძეებით. საერთოდ, ექსიმერული ლაზერები განკუთვნილია კონკრეტულ გაზის ნარევისთვის, ამიტომ, ტალღის სიგრძე ცვლილება არ არის ტრივიალური საკითხი, რადგან ახალი სიგრძის სინათლის ტალღის წარმოება ბოლიტურად განსხვავებულია და განსხვავებულია თვით ნივთიერების მიერ სინათლის შთანთქმის მოვლენაც. მაგალითად, ჰაერი სინათლეს შთანთქავს 193ნმ-ის ფარგლებში, ამ ნიშნულის ქვემოთ საჭირო ხდება ვაკუუმური სისტემის გამოყენება ფოტოლიტოგრაფიის პროცესისას, ეს კი საკმაოდ დიდი გამოწვევაა ტექნოლოგიების წინაშე. უფრო მეტიც, დიელექტრიკული მასალის სილიციუმის დიოქსიდის (SiO₂) გამოყენება და მისი ექსპონირება ხდება მისი აკრძალულ ზონაზე მაღალი ენერჯის ფოტონებით, მაშინ ხდება ელექტრონების და ხვრელების გენერაცია და მიიღება უარყოფითი მუხტი.

ამასთან, ბოლო ორი ათეული წლის განმავლობაში ამ მიზნით სწრაფი განვითარება ჰპოვა ე.წ. ექსიმერულმა ნათურებმა, რომლებმაც გარკვეული უპირატესობები შეიძინა სხვა

ულტრაიისფერი გამოსხივების წყაროებთან შედარებით. ოპტიკური ლიტოგრაფია განვითარდა და მიაღწია გამოსახულების ზომას 50ნმ, რისთვისაც გამოყენებულ იქნა ArF ექსიმერული ლაზერი ტალღის სიგრძით 193ნმ და თხევადი სისტემა „immersion techniques”. ეს სისტემა გულისხმობს, რომ სინათლე ლინზების სისტემის შემდეგ გაივლის სითხეს და შემდეგ ხვდება ფოტორეზისტზე. ეს ტექნიკა საშუალებას იძლევა **NA** კოეფიციენტი გაიზარდოს 1-მდე. სითხის როლში გამოიყენება ულტრა სუფთა დეიონიზირებული წყალი, რომლის გარდატეხის მაჩვენებელი მეტია ვიდრე ჰაერის. წყალი მუდმივად ცირკულირებს, რათა გამოირიცხოს ტემპერატურული ეფექტები. წყლის გამოყენების შემთხვევაში **NA** იზრდება 1,4-ჯერ, ხოლო სხვა მასალის (მაღალი გარდატეხის მაჩვენებელი) გამოყენების შემთხვევაში მისი სიდიდე მკვეთრად გაიზრდება.

3. დასკვნა

ფოტოლიტოგრაფიამ გვერდი აუარა მოსაზრებას რომ მისი განვითარება შეწყდა. მაგალითისთვის, 1980-იანი წლების დასაწყისში მრავალი ნახევარგამტარული ხელსაწყოების მწარმოებელი კომპანიები თვლიდნენ, რომ არ შეიძლებოდა გამოსახულება ოპტიკურად მიეღოთ 1მკმ-ზე მცირე ზომის. თანამედროვე ხელსაწოები იყენებენ ექსიმერულ ლაზერულ ლიტოგრაფიას და სავსებით შესაძლებელია სინათლის ტალღის სიგრძის გამოსახულებების მიღება. ახალი ტექნოლოგიების გამოყენებით, როგორცაა „immersion” ლიტოგრაფია, შესაძლებელია მაღალი რეზოლუციის 193ნმ-იანი ლიტოგრაფიის განვითარება. თანამედროვე კვლევები აფართოვებს ულტრაიისფერი ლიტოგრაფიის ალტერნატიულ საშუალებებს, როგორებიცაა ელექტრონულ სხივური ლიტოგრაფია, რენტგენული ლიტოგრაფია, უკიდურესი ულტრაიისფერი ლიტოგრაფია და იონური პროექტირების ლიტოგრაფია.

4. გამოყენებული ლიტერატურა

1. Jaeger, Richard C. (2002). "Lithography". Introduction to Microelectronic Fabrication (2nd ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall. ISBN 0-201-44494-1.
2. Nalamasu, Omkaram, et al. "An Overview of Resist Processing for DUV Photolithography".
3. La Fontaine, B., "Lasers and Moore's Law", SPIE Professional, Oct. 2010, p. 20; <http://spie.org/x42152.xml>
4. Jain, K. "Excimer Laser Lithography", SPIE Press, Bellingham, WA, 1990.
5. Jain, K. et al., "Ultrafast deep-UV lithography with excimer lasers", IEEE Electron Device Lett., Vol. EDL-3, 53 (1982): http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1482581
6. Lin, B. J., "Optical Lithography", SPIE Press, Bellingham, WA, 2009, p. 136.
7. Basting, D., et al., "Historical Review of Excimer Laser Development," in "Excimer Laser Technology", D. Basting and G. Marowsky, Eds., Springer, 2005.
8. American Physical Society / Lasers / History / Timeline; <http://www.laserfest.org/lasers/history/timeline.cfm>
9. SPIE / Advancing the Laser / 50 Years and into the Future; <http://spie.org/Documents/AboutSPIE/SPIE%20Laser%20Luminaries.pdf>
10. U.K. Engineering & Physical Sciences Research Council / Lasers in Our Lives / 50 Years of Impact; http://www.stfc.ac.uk/Resources/PDF/Lasers50_final1.pdf
11. Hand, Aaron. "High-Index Lenses Push Immersion Beyond 32 nm".

5. ფოტომსახლა

