

Uspostava procesa optičke litografije

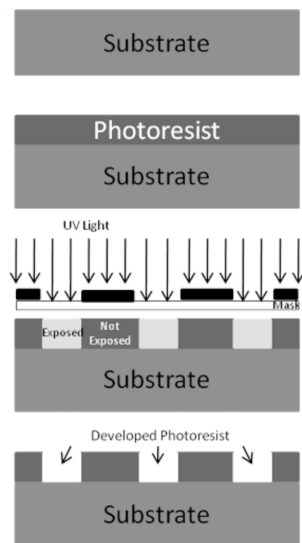
Filip Šurina

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

Optička litografija, ključna tehnika u području mikroprodukcije, predstavlja temelj za izradu složenih uzoraka na waferima od silicija, neophodnih za razvoj mikroelektroničkih uređaja i integriranih krugova. U nastavku ovog rada detaljno se opisuju svi koraci procesa optičke litografije koji su potrebni za izradu kontakata reda veličine 10 mikrona, prikladnih za mjerenje svojstava kvazi 2D ili tankih 3D materijala. Proces započinje pripremom wafera, uključujući temeljito čišćenje i premazivanje tankim slojem fotosenzitivnog materijala, pozitivnog fotorezista, na wafer tehnikom "spin coating". Naknadno "soft bake" grijanje wafera uklanja otapala i osigurava ravnomjeran sloj debljine nekoliko mikrona, završavajući pripremu za ključni korak ekspozicije dizajna. Nakon ekspozicije fotorezist se razvija u odgovarajućoj otopini, te se u nastale udubine naparuje 2 nm kroma i nakon toga 30 nm zlata. Otapanjem u acetonu ukloni se preostali neosvijetljeni fotorezist, te na waferu preostaju samo kontakti od zlata. Kontakti su uspješno proizvedeni s najtanjim značajkama širine 40 mikrona. Testiranje maksimalne rezolucije nije uspjelo zbog prekratkog vremena ekspozicije.

I. UVOD

Optička litografija je ključan i složen proces koji leži u srcu modernog proizvodnog procesa poluvodičkih uređaja, igrajući ključnu ulogu u stvaranju mikroelektroničkih uređaja i integriranih krugova. Riječ fotolitografija dolazi iz tri grčke riječi: photo, litho i grapho koje po redu znače svjetlo, kamen i pisanje. Kao što samo ime sugerira, fotolitografija je metoda printanja u kojoj svjetlost igra ključnu ulogu.



Slika 1: Standardni koraci optičke litografije

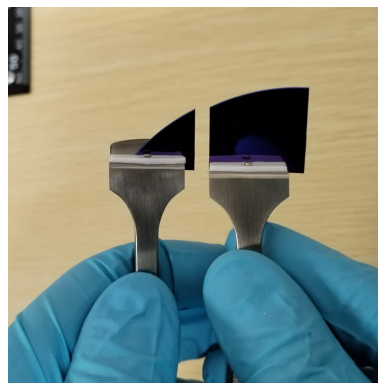
Proces počinje nanošenjem materijala osjetljivog na svjetlost (fotorezista) na podlogu, tipično wafer od silicija. Zatim se preko fotorezista postavlja fotomaska koja sadrži željeni uzorak. Svjetlo prolazi kroz fotomasku, ekspozicionirajući fotorezist na željenim područjima. Izložena područja prolaze kroz kemijsku promjenu, što ih čini topivim ili netopivim u otopini razvijачa (eng. developer), ovisno o tipu korištenog fotorezista. Nakon razvijanja,

uzorak se prenosi na podlogu najčešće procesima napanjanja metala i jetkanja (eng. etching). Razvijanje metode je počelo sredinom prošlog stoljeća, te se kontinuirano razvijala do danas. Trenutno se na Tajvanu u tvornici TSMC rutinski proizvode čipovi s tranzistorima veličine 3 nm. Bez optičke litografije moderna tehnologija ne bi bila moguća. U ovom radu cilj je fotolitografijom proizvesti kontakte reda veličine 10 mikrona prigodne za mjerenje svojstava kvazi 2D ili tankih 3D materijala.

II. EKSPERIMENTALNA METODA

II.1. Priprema wafera

Prvi korak pripreme wafera je njegovo rezanje na kvadratiće prikladne veličine. Waferi dolaze u obliku kruga promjera 6 inča (15.24 cm), te se režu na kvadrate dimenzija 1x1 inč (2.54 cm). Ova veličina je prikladna za ovaj eksperiment jer daje dovoljnu površinu za printanje 16 uzoraka kontakata po waferu uz rub koji se može hvatati s pincetama i sličnim pomagalicama pri prenošenju wafera bez oštećenja dobivenih kontakata.



Slika 2: Razdvajanje dva dijela wafera

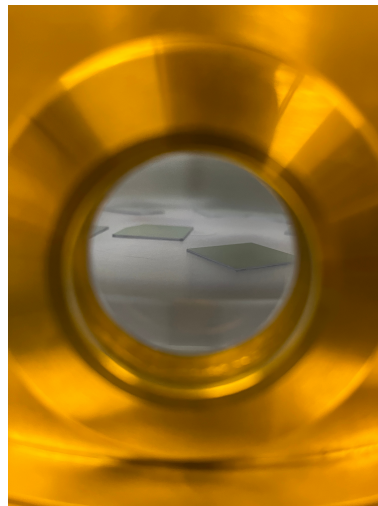
Setom za rezanje s dijamantnim vrhom, povuče se ravna linija po waferu, te se on laganim pritiskom pinceta s obje strane reza lagano otkine. Na taj su način narezani 1x1 inč waferi korišteni u eksperimentu. Drugi korak pripreme wafera je njihovo čišćenje. Ovaj proces sastoji se od 4 koraka. Prvo se waferi u svom 3D printanom plastičnom držaču urone u aceton te se 10 minuta ultrazvučno čiste uz blago zagrijavanje na temperaturu od 40°C . Nakon ultrazvučnog čišćenja, waferi se isperu prvo s malom količinom acetona, a zatim i izopropilnog alkohola (s kojim se radi drugi korak čišćenja) da se otapala međusobno ne kontaminiraju i da ih je moguće nekoliko puta ponovno iskoristiti. Ova procedura se ponavlja između svakog koraka s otapalom iz sljedećeg koraka. Drugi korak čišćenja je isti kao prvi samo što se waferi urone u izopropilni alkohol. Treći korak je pranje u HELLMANEX otopini. HELLMANEX je alkalni koncentrat koji se u otopini koncentracije 0.5-2% koristi za laboratorijsko čišćenje wafera. Sprječava redepoziciju otpuštenih čestica i osigurava ispiranje bez ostataka nakon čišćenja. Zadnje ispiranje, nakon HELLMANEXA, radi se s deioniziranom vodom.



Slika 3: Ultrazvučno čišćenje wafera

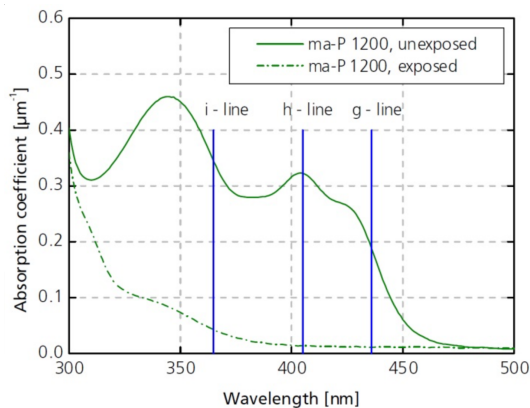
Waferi se zatim suše prvo dušikom, a nakon toga se stavljaju iznad pročišćivača zraka na još nekoliko sati da bi se potpuno osušili. Zrak neposredno iznad pročišćivača zraka prolazi kroz HEPA filter koji hvata 99.97% svih čestica veličine 0.3 mikrona i veće. Ovo je najčišći dio cijelog laboratorija i na waferima se tijekom sušenja ne bi trebale skupiti čestice prašine koje bi na skali veličine kontakata koje proizvodimo izgledale ogromno i uništile bi cijeli proces. Zadnji, četvrti korak je čišćenje plazmom kisika u trajanju od 5 minuta. Plazma čišćenje plazmom kisika eliminira ulja i masnoće na nano razini i smanjuje kontaminaciju do 6 puta u usporedbi s metodama mokrog čišćenja, uključujući i same ostatke čišćenja otapalima. Plazma čišćenjem dobiva se besprijekorna površina, spremna za daljnju obradu. Također, plazma čišćenje čini površinu wafera hidrofilnom što će pomoći pri premazi-

vanju fotorezistom što je upravo idući korak pripreme.



Slika 4: Čišćenje wafera plazmom kisika

Fotorezisti su polimerni materijali koji mijenjaju svojstva topljivosti u tekućini za razvijanje kada su dovoljno eksponirani zračenju odgovarajuće valne duljine. Kemijska svojstva područja fotorezista pogođenih zračenjem mijenjaju se na način koji ovisi o vrsti korištenog fotorezista. Eksponirana područja pozitivnih fotorezista postat će topljivija u sredstvu za razvijanje, tako da pozitivni rezisti stvaraju pozitivnu sliku uzorka na waferu. Negativni rezisti stvaraju negativnu sliku uzorka na waferu jer eksponirana područja postaju manje topiva u sredstvu za razvijanje. U ovom eksperimentu korišten je pozitivni fotorezist ma-P 1200. Njegov koeficijent apsorpcije u ovisnosti o valnoj duljini zračenja kojem je izložen, prikazan je na slici 5.



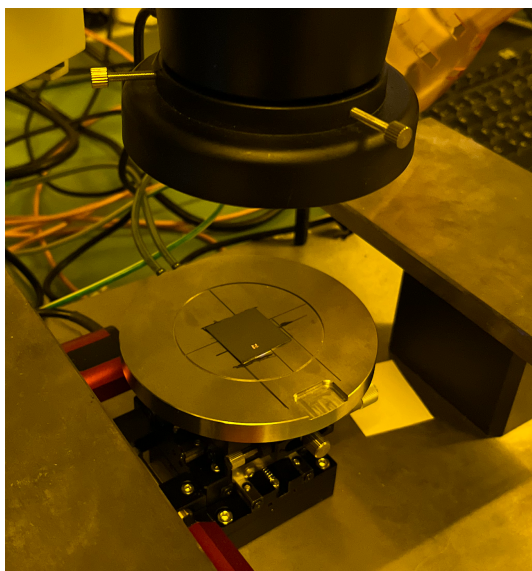
Slika 5: Graf ovisnosti koeficijenta apsorpcije fotorezista ma-P 1200 u ovisnosti o valnoj duljini zračenja kojem je izložen

Cijeli laboratorij je nužno zakloniti od vanjskog svjetla i u laboratoriju koristiti samo narančastu rasvjetu valne duljine oko 600nm na koju fotorezist nije osjetljiv.

Nanošenje tankog filma fotorezista na wafer radi se "spin coating" metodom. "Spin coating" je laboratorijska metoda za stvaranje tankih i homogenih filmova iz otopina. Otopina se kapaljkom stavlja na wafer koji se zatim vrti velikom brzinom, 3000 okretaja u minuti u vremenu od 30 s. Tekućina se širi zahvaljujući centrifugalnim silama i na podlozi se stvara homogen sloj tekućine debljine 3 mikrona. Nakon nanošenja tankog filma fotorezista na wafere slijedi "soft bake" metoda zagrijavanja koja se radi da bi otapalo iz fotorezista isparilo i da se fotorezist bolje uhvati za površinu wafera. "Soft bake" se radi na temperaturi od 100°C u trajanju 90 s. Ovo je bio kraj pripreme wafera i idući korak je ekspozicija dizajna kontakata na fotorezist.

II.2. Ekspozicija, razvijanje i napanje zlata na wafer

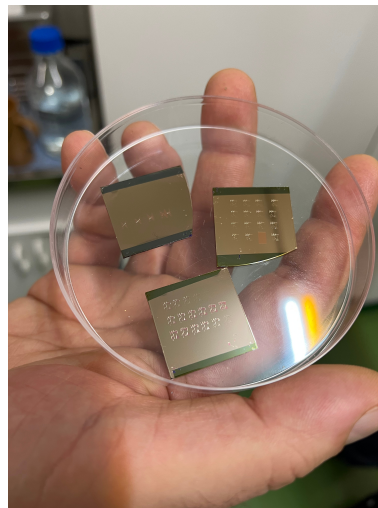
Ekspozicija dizajna kontakata na fotorezist napravljena je koristeći LightCrafter 4500 DLP projektor. Projektor ima rezoluciju 912x1140 piksela. Nacrta kontakata su, imajući to na umu, dizajnirani u programu Inkscape te izvedeni u format bitmape prikladan za projektorov software.



Slika 6: Ekspozicija fotorezista na waferu koristeći projektor LightCrafter 4500 DLP

O ekspoziciji i dizajnima kontakata biti će još riječi u idućem poglavlju u pregledu rezultata. Nakon ekspoziranja pozitivnog fotorezista na waferu, potrebno je otopiti ekspozirana područja u sredstvu za razvijanje u trajanju od 45 s. Zadnji korak dobivanja kontakata je napanje kroma i zlata u udubine u fotorezistu. Kontakti od zlata su jako dobri zbog visoke vodljivosti električne struje zlata uz odličnu otpornost na koroziju. Zlato samo po sebi slabo stvara kontakt sa SiO_2 slojem na waferu

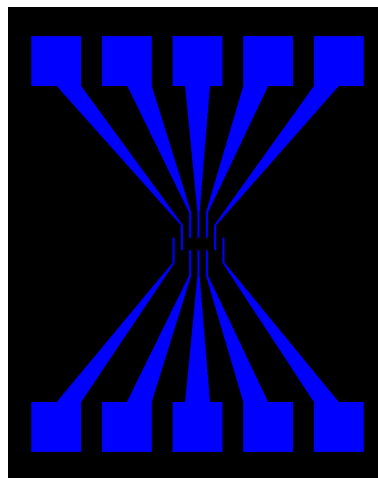
pa je nužno prije njega napaniti sloj od nekoliko nanometara kroma za bolje prijanjanje. Tada će sloj metala na waferu biti čvrst i neće se moći lagano ukloniti s wafera. Waferi nakon napanja prikazani su na slici 7. Nakon 2 nm kroma napareno je 30 nm zlata te su uzorci stavljeni u ultrazvučni čistač u aceton da bi se uklonio preostali neosvijetljeni fotorezist te da na waferu ostanu samo kontakti od zlata.



Slika 7: Waferi nakon napanja kroma i zlata

III. REZULTATI

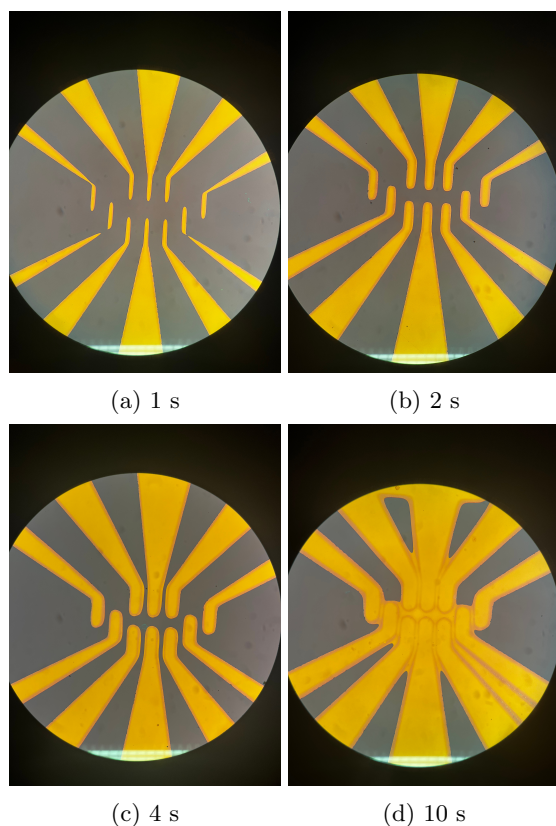
Ekspozirana su ukupno 3 wafera. Na prvi je obasan dizajn prikazan na slici 8. Dizajn kontakata obuhvaća cijelu raspoloživu rezoluciju projektorovog.



Slika 8: Dizajn kontakata ekspoziran na prvi wafer

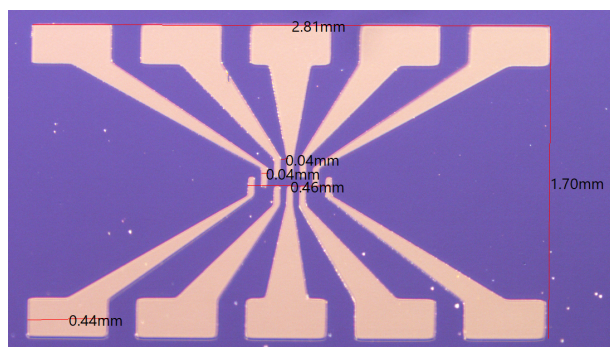
Najtanje, središnje crte na dizajnu širine su 5 piksela i cilj ovog prvog wafera je vidjeti razlike u duljini ekspozicije. Sva 4 kontakta ekspozirana su na maksimalnom

intenzitetu projektora. Vremena ekspozicije su 1, 2, 4 i 10 s.



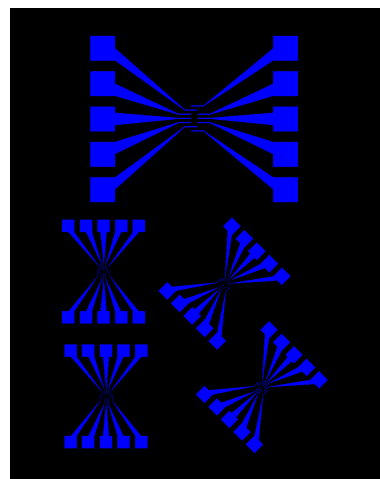
Slika 9: Usporedba vremena ekspozicije

Razlike se mogu vidjeti na slici 9. Pri vremenu ekspozicije od 1 s, kontakt nije ostvaren jer fotorezist nije dovoljno eksponiran i svjetlost projektora na dijelovima nije osvijetlila cijelu debljinu fotorezista do SiO_2 sloja wafera. Kontakt dobiven pri duljini ekspozicije 10 s je previše osvijetljen što je jasno vidljivo iz činjenice da su svi vrhovi spojeni. Duljine ekspozicije 2 i 4 s daju zadovoljavajuće kontakte. Svi dijelovi su puni i odvojeni. Vrijeme ekspozicije od 2 s daje najbolji rezultat pa ćemo daljnju analizu dobivene rezolucije napraviti na njoj.



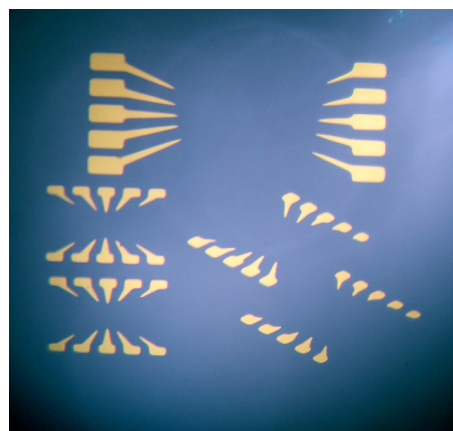
Slika 10: Dobiveni kontakti pri vremenu ekspozicije 2 s s istaknutim dimenzijama

Na slici 10 prikazana je fotografija kontakata dobivenih vremenom ekspozicije od 2 s s istaknutim dimenzijama. Cijeli uzorak je širine 2.81 mm i visine 1.7 mm. Najtanje značajke su širine 40 mikrona što je za ovu potrebu zadovoljavajuće. Preostala dva wafera služila su za daljnje upoznavanje s karakteristikama fotorezista i projektora. Korišten je drugačiji dizajn koji se može vidjeti na slici 11, na kojem je nekoliko veličina kontakata s najtanjim značajkama debljine samo 1 piksel.



Slika 11: Drugi dizajn kontakata korišten na preostala dva wafera

Isprobani su i dizajni kontakata zarotirani za 45° zbog dijamantnog oblika piksela na projektoru. Očekuje se da će zarotirane centralne ravne linije imati puno glađe rubove od onih nezarotiranih. Dobiveni kontakti mogu se vidjeti na slici 12.



Slika 12: Nedovoljno eksponirani uzorci drugog dizajna kontakata

Svi eksponirani uzorci na oba wafera bili su vremenski nedovoljno eksponirani i nigdje nije dobiven iskoristiv kontakt. Može se zaključiti da je za tanje linije potrebna nekoliko puta dulja ekspozicija fotorezista, da bi svjetlost probila do samog SiO_2 sloja na waferu. Gornja gra-

nica minimalne širine linija koja se može postići je 15 mikrona, što je izmjereno na najužim dijelovima ovih nedovoljno eksponiranih uzoraka. Rezultati eksperimenta ne daju konkluzivne zaključke o maksimalnoj rezoluciji projektora, ali ukazuju na to koje su daljnje optimizacije procesa potrebne za povećanje rezolucije.

IV. ZAKLJUČAK

Prikladni kontakti za mjerenje svojstava kvazi 2D i tankih 3D materijala uspješno su proizvedeni. Koristeći dizajn koji pokriva cijelu površinu projektora dobiveni su kontakti širine 2.81 i visine 1.7 mm uz najtanje značajke širine 40 mikrona. Zaključeno je da je za takav dizajn optimalno vrijeme ekspozicije 2 s pri maksimalnom intenzitetu projektora. Također, isproban je i drugi dizajn koji

gura rezoluciju do limita (najtanje značajke na dizajnu su širine samo jedan piksel), ali on nije dao konkluzivne rezultate o maksimalnoj rezoluciji zbog prekratke ekspozicije. Optička litografija u svijetu preostaje ključan moderni proces proizvodnje mikroelektroničkih uređaja i integriranih krugova. Ovaj rad otvara vrata otkrivanju novih zanimljivih svojstava materijala koristeći optičku litografiju za kontaktiranje.

V. ZAHVALE

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Mariu Novaku, doc. dr. sc. Vedranu Đereku te doktorskim studentima Petru Sačeru i Aleksandru Opančaru. Bez bilo kojeg od ovih pojedinaca, cijeli projekt ne bi bio izvediv.

¹ C.Koch, T.J. Rinke (2017). Photolithography, Basics of Microstructuring

² Karakteristike fotorezista: microresist technology ma-P 1200 series positive photoresist, dostupne informa-

cije: <https://www.microresist.de/en/produkt/ma-p-1200-series-ma-p-1275-hv/>

³ Specifikacije projektora: Texas Instruments Light-Crafter 4500 DLP projector, detalji proizvoda: <https://www.ti.com/product/DLP4500>