

A félvezetőgyártás ábrakialakítási módszerei

Készítette: Fekete Zoltán, Dr. Fürjes Péter

A mérés célja: A gyakorlat célja az optikai litográfia elméleti alapjainak, valamint az ábrakészítés lépéseinek megismerése. Először a fotokémiai reakció és az optikai leképzés elméletét tárgyaljuk, s ezt követően a fotolitográfiai technológiában használatos eszközök és eljárások részleteit ismerjük meg.

A mérési feladat: Litográfiai lépéssor elvégzése; Ábrakialakítás szilíciumra leválasztott vékonyrétegben

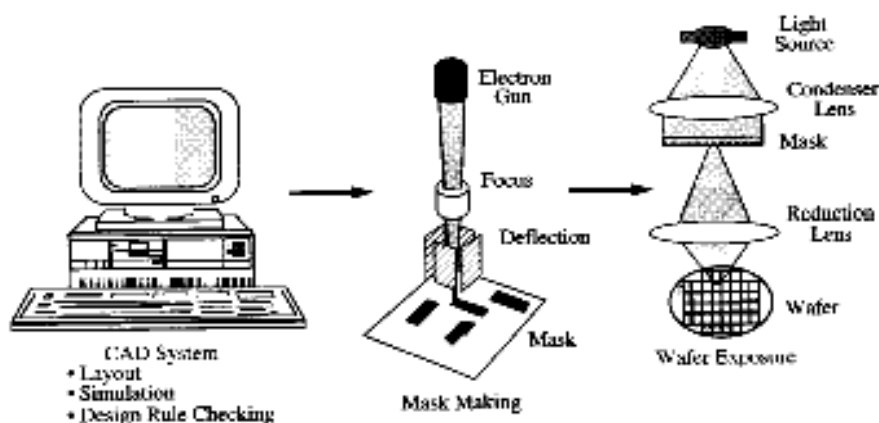
A mérés elvégzésével megszerezhető képességek: ...

Elméleti összefoglaló

A félvezetőgyártásban litográfián azon technológiai eljárások összességét értjük, amelyekkel az áramkörök rajzolatait előállítják. A litográfiai technológiai folyamatban a kívánt rajzolat valamilyen mester adatforrásból (pl. mestermaszkról), képátviteli eljárással kerül az áramköri hordozó felületére, rendszerint struktúrált rezisztréteg formájában.

A litográfia egyik legfontosabb jellemzője a felbontás, ezen a legkisebb, még használható rajzolatelem vagy vonalszélesség méretét értjük. Minél kisebb az információt vivő sugár hullámhossza, annál nagyobb a felbontás. A képátvitelnél az információt hordozó médium lehet fény-, elektron-, röntgen- vagy ionsugár. A mikroelektronikában legelterjedtebben az **optikai litográfiát (fotolitográfiát)** használják

Az 1. ábra egy litográfiai folyamatot szemléltet. A rajzolatot szoftveres úton tervezzük meg, majd a gyártáshoz szükséges maszkosorozatot állítjuk elő. A képátviteli berendezés (maszkillesztő) a hordozó felületére felvitt reziszt rétegbe exponálja a maszkon kialakított mintázatot.

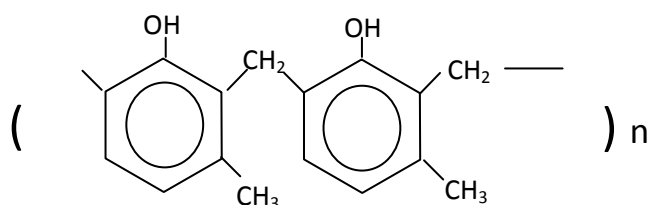


1. ábra: Az optikai litográfiai eljárás teljes folyamatának blokkvázlata

Fotokémiai reakció, a fotoreziszt

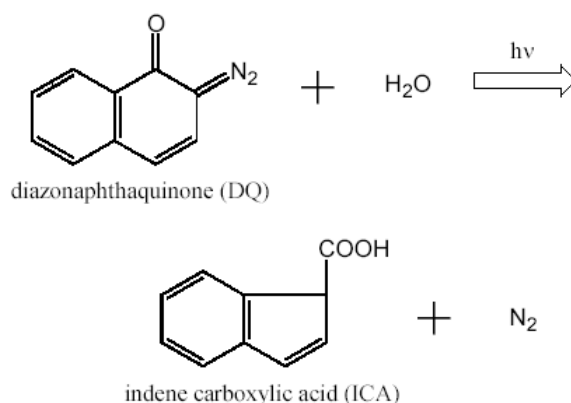
A fotolitográfiai műveletek során egy fényérzékeny, többkomponensű polimer filmből egy lakkmintázat készül. Kémiai összetételét tekintve a polimerfilm, röviden lakk, vagy reziszt, három különböző komponensből áll, a novolakk filmképző polimerből, a fényérzékenyítőből és a két komponenst oldatban tartó oldószerkelegyből. Szárazanyagának 30-40 tömegszázaléka a vízben nem oldódó diazonaftokinon(DQ) fényérzékenyítő, mely inhibitor hatása folytán korlátozza a másik komponens oldékonyságát a hívó oldatban.

Az exponálás során, a fénnel megvilágított helyeken fotokémiai reakció játszódik le, a lakk naftokinondiazid(DQ) komponense átalakul, ennek reakcióterméke az indékarbonsav(ICA). Az exponált lakk a hívó oldatban rendkívül jól oldódik, ha megfelelően nagy a DQ koncentráció, ezzel együtt nő a kontraszt is, azaz az exponált és nem exponált lakk oldékonyságának különbsége.



Novolakk filmképző polimer

A LAKKBAN LEJÁTSZÓDÓ FOTÓKÉMIAI REAKCIÓ



2. ábra A fotoérzékeny lakk fotokémiai reakciója

Az exponáláshoz az u.v. fényforráson kívül egy ún. maszkra van szükség. A maszk egy speciális planparallel üveglemez, melynek egyik oldalán króm vékonyréteg mintázatot alakítottak ki. Az exponálás során az üveglemez átlátszó részén áthatoló fény okozta fotokémiai reakció a fentiek szerint megy végbe.

A novolakk filmképző polimer nem fényérzékeny, illetve a vizsgált 365-436nm-es tartományban kémiaiilag stabil. Ez az a hullámhossz tartomány, amelyen belül használjuk az közeli u.v. tarományban érzékeny pozitív fotolakkokat. (G line resists)

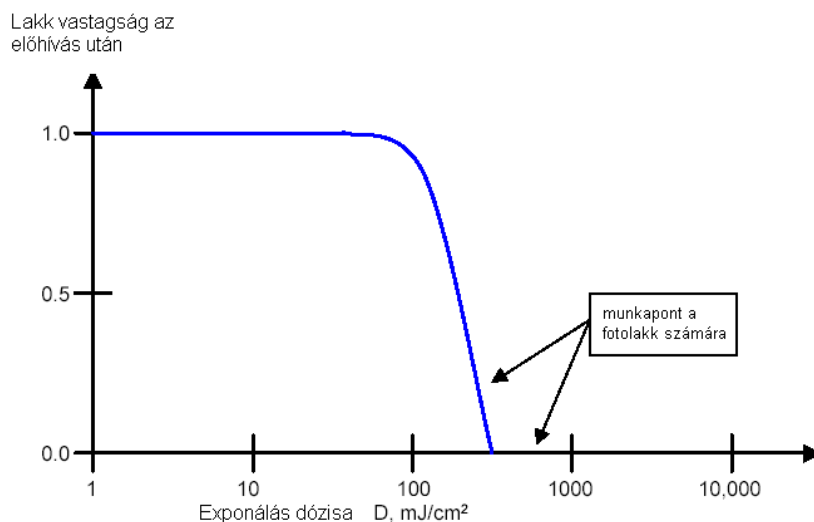
A fentiekben leírt fotolakk pozitív működésű, ami azt jelenti, hogy a maszkon levő átlátszatlan mintázat a lakkban azonos kontraszttal képződik le, vagyis a maszk mintázatnak megfelelő lakk mintázat alakul ki a szilícium szeleten. A pozitív fotolakkok előnyös tulajdonságai miatt elterjedtebbek, mint a negatív fotolakkok, mivel a pozitív lakk alkalmas nagyfelbontású, finom mintázat kialakítására, a finom minta megőrzi az alakját az előhívás folyamata alatt is, s ellenálló a plazma-műveletekkel szemben.

Fotoreziszttek legfontosabb jellemzői:

- Fényérzékenység: az abszorbeált fotonok mennyiségének és a fotokémiai folyamatban átalakult molekulák számának viszonya
- Spektrális érzékenység: azt a hullámhossztartományt jellemzi, melyre a fotorezisztet optimalizálták
- Viszkózitás: fontos paraméter, hiszen a centrifugálással létrehozott film rétegvastagságát befolyásolja
- Kontraszt: a kiexponált és a kiexponálatlan lakk oldási sebességének hányadosa
- Felbontóképesség: az elérhető legkisebb vonalvastagság
- Hibasűrűség: a rezisztfilmben lelhető túlyukak fajlagos száma

Az előhívás folyamata

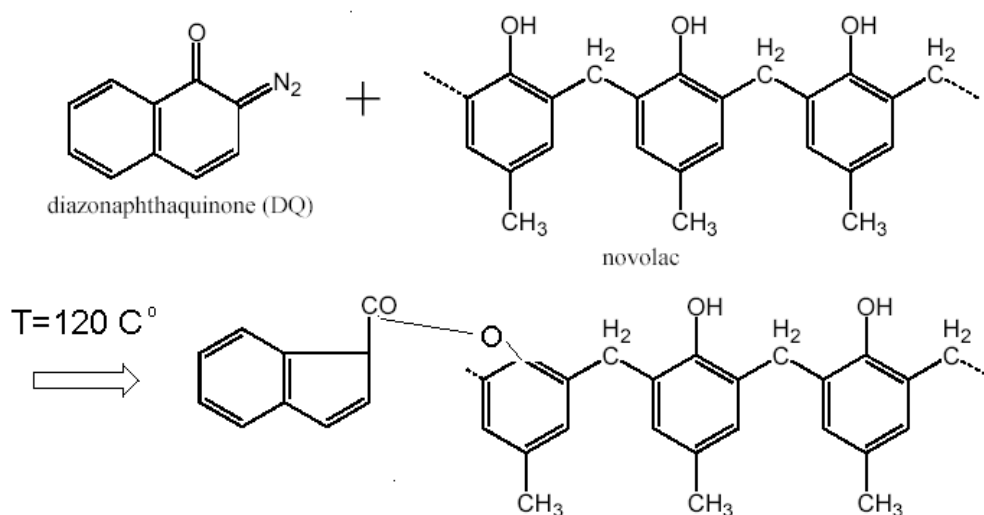
Az exponált lakk oldékonysága a hívó oldatban egy adott dózis küszöbértéknél $D_{\min}$ hirtelen megváltozik, vagyis a fotokémiai reakció az exponált terület alatti teljes térfogatban lejátszódik megfelelő hatásfokkal. Az optimális dózis $D_{\min}$ -nál mindig nagyobb, de közel esik a munkapont ehhez az értékhez (lásd 3. ábra).



3. ábra: Az előhívás után megmaradó lakkvastagság az exponálás dózisének függvényében

A hőkezelés folyamata

A maszk mintázatnak a fotolakkra történt exponálása és előhívása után kialakul egy olyan lakkmintázat a hordozón, melynél a mintázat topológiája szerint fedett és fedetlen területek vannak. A lakkal fedett részekben a fotolakk az erős ásványi savakkal szemben ellenállóvá válik, ha további hőkezelésnek vetik alá.



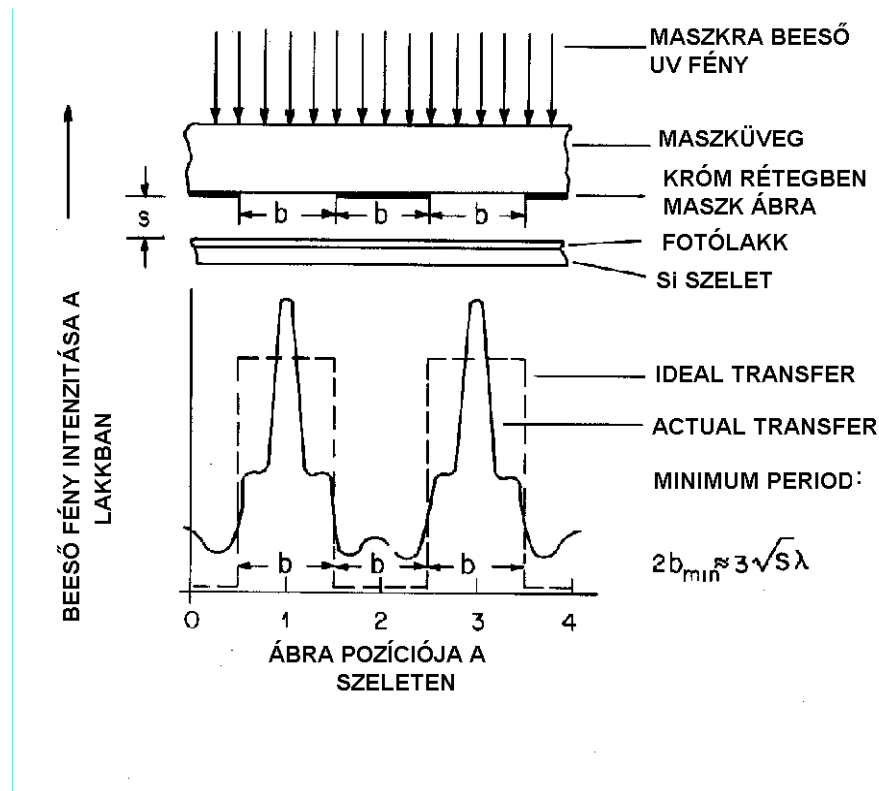
4. ábra az A polimer háló kialakulását kísérő reakció

Az inhibítor molekula és a novolakk észter kötést hoz létre, s az így létrejött makromolekula nemcsak a szobahőmérsékleten, hanem egészen 60-80°C-ig is stabil marad ásványi savak elegyében akár

néhányszor 10 percig is. A salétromsav roncsolja a lakkot, így csak nagyon kis mennyiségben szabad tartalmaznia az alkalmazott marószereknek.

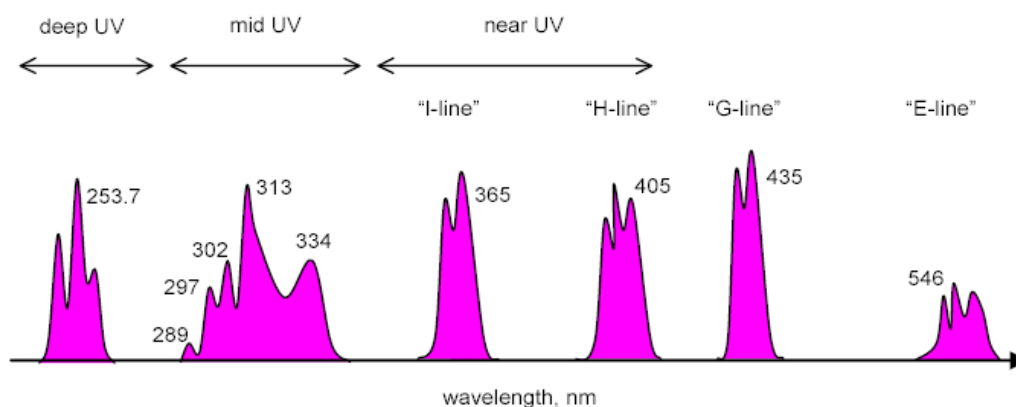
A fotolitográfias maszkillesztő berendezések elvi működése, az optikai ábraleképzés

A maszkillesztő és exponáló berendezések segítségével a szeleten már előzőleg kialakított mintázathoz egy következő maszk szintnek megfelelő ábrát lehet nagy pontossággal hozzáilleszteni. A berendezések egyik fő része, a mechanikus mozgató rendszer, mely képes a szelet x-y pozícióját, valamint a szögállását 1 mikronnál kisebb eltéréssel beállítani, még akkor is, ha maga a berendezés a higanygőzlámpa G vonalára van optimalizálva.



5. ábra: A maszkillesztő berendezés elvi vázlata és a lakkban kialakult intenzitás-eloszlást a maszkon levő átlátszó és átlátszatlan területek periodikus mintázata esetén.

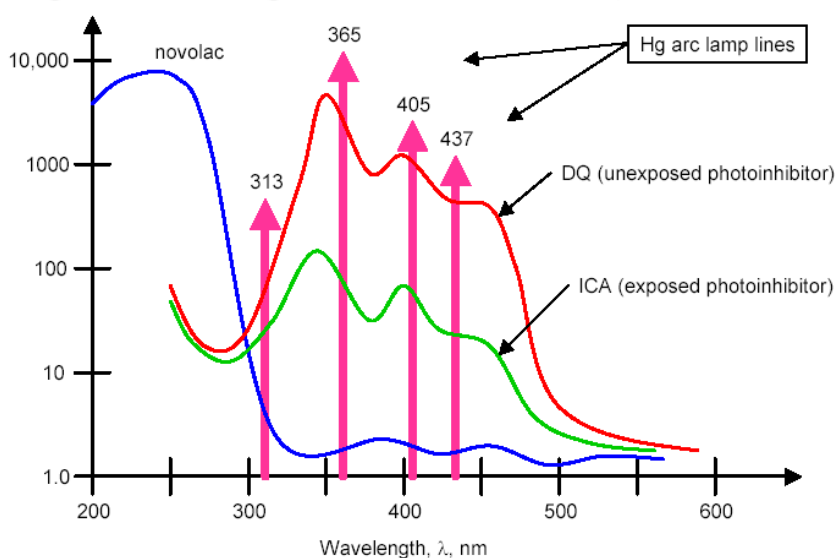
A maszkillesztő berendezés optikája egy kollimátor lencserendszerrel biztosítja a párhuzamos fényt, melynek fényforrása a nagynyomású higanygőzlámpa. Emmissziós spektruma az alábbi ábrán látható. Az üvegből készült optika a 365 nm-nél kisebb hullámhosszúságú fényt már szinte teljes mértékben elnyeli, ezért ha a felbontóképességet tovább akarjuk növelni az alkalmazott hullámhossz csökkentésével, az üveg optikát kvarc optikára kell lecserélni.



6. ábra. A nagynyomású higanygőzlámpa emissziós spektruma.

A fényérzékenyítő (DQ) érzékeny a nagynyomású higanygőzlámpa három emissziós vonalára: a G (435-7nm), H (405nm) és I (365nm) vonalakra. A fényelnyelés következtében lejátszódó fotokémiai reakció reakcióterméke, az ICA spektrális abszorpciója már sokkal kisebb, vagyis a lakk "kifehéredik" (bleaching) az exponálás folyamata alatt. A fotolakk gyártók úgy finomítják a lakk készítés technológiáját, hogy a G, H és I vonalakra speciálisan érzékeny lakkokat hoznak forgalomba.

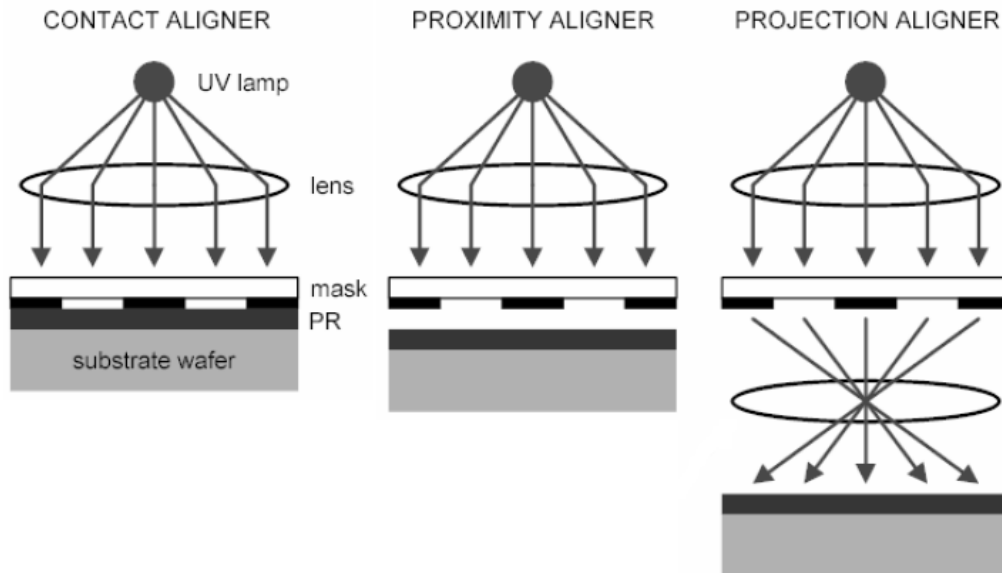
Spectral Absorption of Novolac, DQ, and ICA



7. ábra: A pozitív fotolakk spektrális abszorpciója

Maszkillesztés

Maszkillesztésre többféle módszert is használnak, a legelterjedtebbek a kontakt, proximity és a projekciós eljárások.



8. ábra: A fotolitográfiai eljárások során alkalmazott maszkillesztési módszerek

Kontakt üzemben a maszkot vákuummal a félvezető hordozóra szorítják, 2-4 μm -es rést hagyva az expozícióhoz. A kép a maszkról 1:1-es árnképzéssel kerül a rezisztbe. Itt minél kisebb a rés, annál kisebb a diffrakció és annál nagyobb a felbontás. A kontaktílesztők egyik nagy hibája, hogy összeszorításkor a maszk és a szeleten levő reziszt is könnyen sérülhet. A várható felbontóképesség a kontakt másolásnál:

$$2b = 3\sqrt{0,5\lambda d}$$

ahol λ = exponáló fény hullámhossza, d = lakkréteg vastagsága, $2b$ = minimális periódus méret, s = maszk-lakk távolság, Kontakt másolás esetén a lakk és a maszk között közel optikai kontaktus alakul ki. Ha $\lambda = 400\text{nm}$, $d = 1\mu\text{m}$, akkor 0,7 μm -os felbontást kapunk.

Proximity másolásnál egy bizonyos rést alakítanak ki a lakkréteg és a maszk között, így a felbontóképesség ugyan romlik a diffrakciós hatás miatt, de a maszk nem szennyeződik, mivel a lakkréteg és a maszk nem érinti egymást. A felbontóképesség egyenlete tartalmazza az s tagot is, ami a maszk és a reziszt távolsága ($s = 5\text{-}30\mu\text{m}$):

$$2b = 3\sqrt{\lambda(s + 0,5d)}$$

Ha $\lambda = 400\text{nm}$, $s = 10\mu\text{m}$ és $d = 1\mu\text{m}$, akkor $b = 3.0\mu\text{m}$ -os felbontást kapunk.

A **projekciós maszkillesztőknél** az ábra nem árnyképzéssel, hanem vetítéssel kerül a rezisztbe. Mély UV-s fényforrást alkalmazva akár 200nm-es felbontás is elérhető, azonban ez mindenképp bonyolult és költséges optikai egységet igényel.

Litográfiai technikák	Direkt írásos eljárás	Reziszt előhívást igényel	Hozzáférhetőség	Tömegtermelésre alkalmas	3-D alakzat	Felbontás (nm)	Oldalarány
Optikai litográfia	Nem	Igen	Iparban elterjedt	Igen	Nem	250	-
Röntgen litográfia	Nem	Igen	Ritka és drága	Igen	Igen	<250	<100
Mély UV litográfia	Nem	Igen	Ritka	Igen	Igen	<250	10
Elektronsugaras írás	Igen	Igen	Közepes	Nem	Nem	$n \cdot 10$	10
Kisenergiájú ionsugaras írás	Igen	Nem	Ritka	Nem	Nem	<100	<5
Nagy energiájú ionsugaras írás	Igen	Igen	Nagyon ritka	Nem	Igen	100<	150

9. ábra: A jelenlegi szub-mikronos litográfiai eljárások összefoglalása

Maszkkészítés

A maszk a litográfiában a képátvitel egyik legfontosabb kelléke, melyet ún. ábragenerátorokkal állítanak elő. Ezek a berendezések a kívánt ábrát N -szeres ($N=1, 5, 10$ stb.) léptékben, változtatható oldalméretű négyzetek egymás utáni levilágításával, mozaikszerűen állítják elő a tárgyasztalon levő maszkalaplemezen. A tárgyasztal X - Y irányú mozgását, a levilágított négyzet x - y oldallapjainak változtatását és az expozíciót végző fényzárát számítógéppel vezérlik. Az így létrejövő maszk az első felvétel (reticle-maszk) az áramkör valamely technológiai lépéshez szükséges rajzolatát tartalmazza. Az 1:1-es ún. mestermaszkot az első felvétel lekicsinyítésével és egymás mellé léptetésével készítik, az ún. léptetőkamerával.

A maszkok alapanyaga speciális 1,5-2 mm vastag szóda, boroszilikát, kvarc stb. alapanyagú üveglemez, melynek a síktól való eltérése néhány um. A maszkábrát túlyukmentes fotoemulzióval, vas-oxid vagy króm-króm-oxid vékonyrétegrendszeren hozzák létre (~100 nm).

A maszkmegmunkálási technológia is a fotolitográfia eszköztárát használja, így maszkprocesszálas is exonálásból, előhívásból, maratásból, reziszteltávolításból és különböző tisztítási lépésekből áll.

Fotolitográfiai reziszttechnológia lépései

Általános megfogalmazásban optikai litográfiával mintázatokat lehet kialakítani egy hordozóra felvitt vékonyrétegben. Először a fényérzékeny polimert (fotolakk oldatot) terítik a mintára, ezt követően a lakkréteg szárítása történik két lépésben. A lakkal fedett mintára helyezett maszk megvilágítása után az előhívás, azaz az exponált lakk szelektív kioldása következik. További hőkezelés után, a lakkal nem fedett helyeken kimarják a vékonyréteget. Ennek értelmében az alábbi technológiai lépések szükségesek a lakkmintázat, majd a vékonyréteg mintázat előállításához:

1. Dehidratálás: szelet hőkezelése a felületen megkötött víz eltávolítására
2. Adhéziónövelő kémiai kezelés (pl. HMDS)
3. Lakk felvitele centrifugálással
4. Lakkszáritás (softbake): oldószerek eltávolítása hőkezeléssel
5. Expozíció: maszkillesztést követő levilágítás
6. Előhívás (develop): kiexponált lakk eltávolítása
7. Lakkbeégetés (hardbake): a lakkréteg keményítése és az adhézió növelése hőkezeléssel.

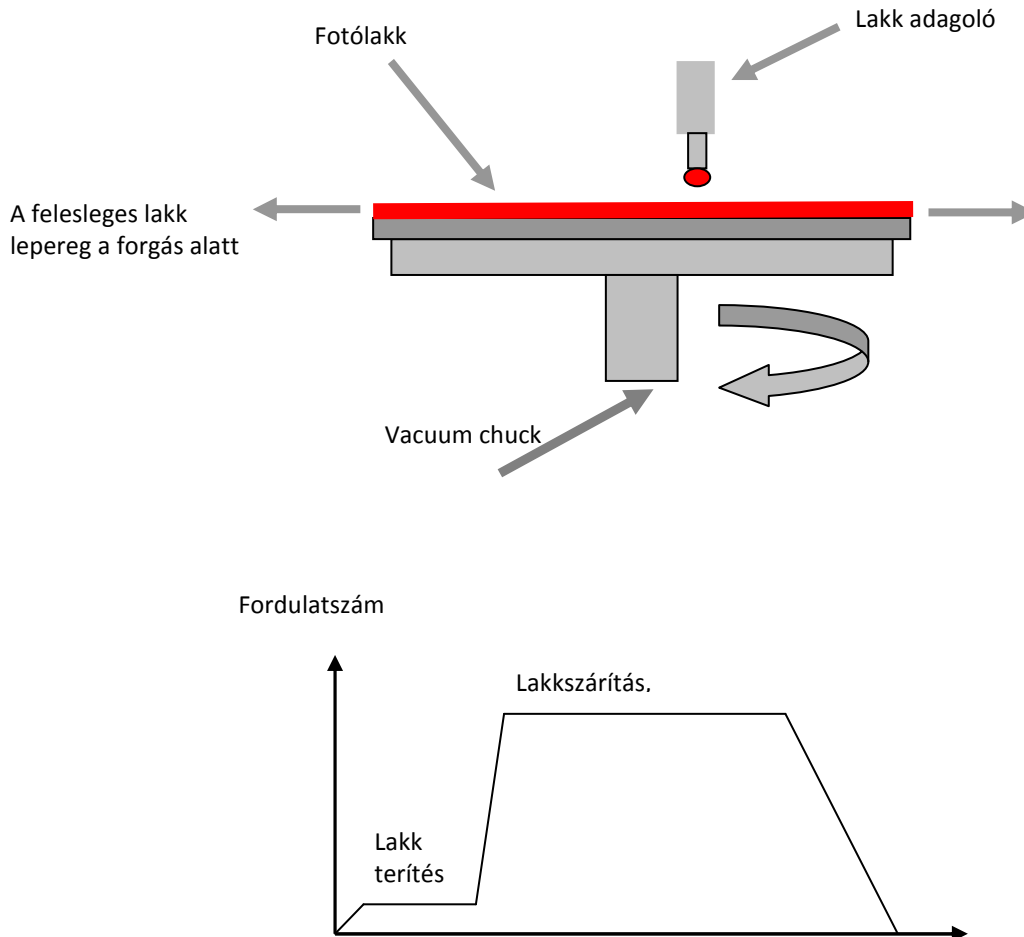
Dehidratálás

A művelet célja, hogy a megmunkálandó vékonyréteg felülete hidrofób legyen. Általában, a frissen leválasztott fémrétegek, a szilícium-nitrid, poli-szilícium, valamint a magas hőmérsékleten készített szilícium-dioxid réteg felülete hidrofób, ezért a dehidratálásra nincs szükség. Ezzel szemben, minden vizes művelet után a szilícium-dioxid rétegen a felületre fizikailag kötött vizet 300C°-os, egy órás szárítással távolítjuk el, a kémiaiilag kötött vizet 900C°-os hőkezeléssel.

Ha a magas hőmérsékletű hőkezelésre nincs lehetőség, a szilícium-dioxid felületére egy tapadásnövelő réteget, ún. primert vihetünk fel centrifugával. Nagy illékonysága miatt egy monomolekulás réteg alakul ki. A primer kémiai elnevezése: hexametil-diszilázán, röviden HMDS. Poláros csoportjai a kémiaiilag kötött vízhez, azaz -OH csoportokhoz kötődnek, míg az apoláros részek beborítják a felszínt, a hidrofóbbá vált felületén jó nedvesítés alakul ki a lakkréteg és a primerrel borított felület között.

Lakkfelvitel

Centrifuga segítségével, két lépésben visszük fel az egyenletes vastagságú lakkréteget. Az első lépés a lakkterítés 600rpm-en 2 másodpercig, a második lépés a szárítás 3-6000 rpm-en 30 másodpercig tart (1. ábra).



10 ábra: Lakkterítő centrifuga, és a centrifugálás folyamata

A lakkréteg vastagságát a lakkoldat szárazanyag tartalma, viszkozitása, a centrifuga fordulatszáma és a környezet hőmérséklete határozza meg. Az oldószer illékonysága kisebb mértékben, de szintén hat a film vastagságára. Kiválasztásakor újabban a polimerek oldhatóságán és a filmképzési tulajdonságok optimalizálásán kívül a környezetre, az egészségre való káros hatást is figyelembe veszik.

Lakkfelöntés hibái:

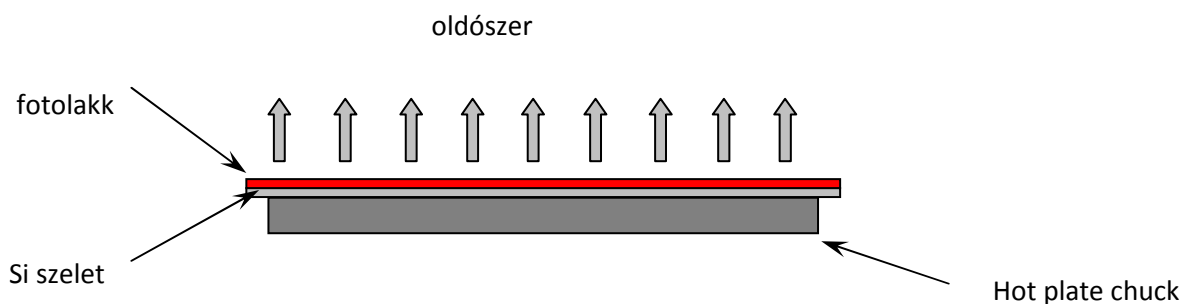
- Striation, bordázottság: ha sugárirányú színes vonalakat látunk a felpörgetett rezisztben, akkor a vastagsága nem homogén, min. 30 nm-es vastagságtérést tapasztalhatunk.
- Lakkperem: Vastagság eltérés a kerület mentén, mely maximum 100-1000nm-el tér el a szelet közepén mért vastagságtól.
- „Pávaszem”: ellipszis alakú mintázat radiális irányban, szilárd részecskék (pl. a maszk szennyeződése okozhatják)

Beégetéskor (hardbake) előforduló hibák:

- A lakkára magasság-szélesség arányától függően változik a lakkára laterális mérete
- Magasabb hőmérsékletű és hosszabb hőkezelés után nehezebb eltávolítani a lakkot.

Lakkszáritás

A művelet célja a lakkfilmben megkötött oldószerek eltávolítása, a réteg tömörítése. Pozitív lakk esetén a hőciklus tipikusan 90-95°C-on konvekciós kályhában történik, vagy 100-120°C-on un. hot plate-en. Az iparban mikrohullámú és infravörös kályhás szárítást használnak. Hot plate használata előnyös, mert gyors, nem képződik a lakkfelszínen kéreg, így az nem zárja el az elpárologtatandó oldószer útját, a művelet jól ellenőrizhető. Jó a termikus kontaktus, mivel sík a felülete. A lakkvastagság kb. 25%-al csökken a lakkszáritás folyamata alatt.

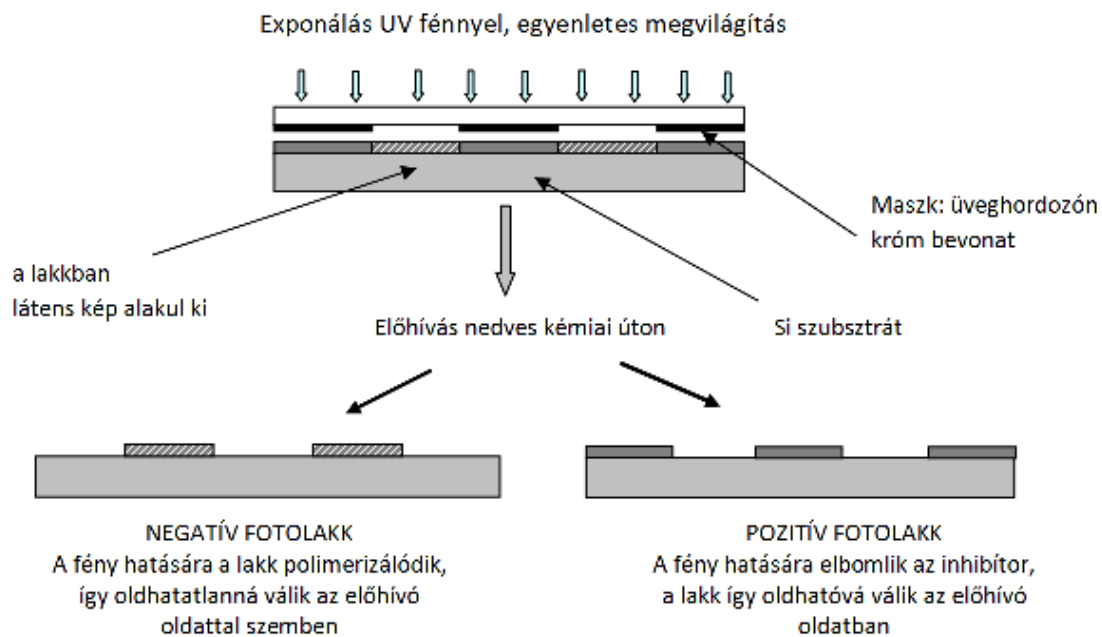


11. ábra: A hot plate-es szárítás

Pontos szárítási hőmérséklet-idő paraméter párok szükségesek a lakkára geometriai méreteinek reprodukálására. Az előhívás ideje is függ a szárítási hőmérséklet-idő paraméterektől az exponált területen, de függ a sötét terület korróziója is a fenti paraméterektől. Az exponálatlan területek oldódása rontja a kontrasztot (a lakk oldalfalak laposabbá válnak), valamint rontja a lakk kémiai ellenálló képességét is. A 100°C-os szárítás már nagymértékben rontja a fényérzékenyítő komponenst, magasabb hőmérsékleten már a kioldás sem lehetséges.

Maszkillesztés, exponálás

Többszörös technológia esetén, a szeleten levő, korábban kialakított ábrához illesztik maszkon levő ábrát egy mikroszkóppal felszerelt maszkillesztő-berendezés segítségével. Az illesztő-berendezés exponáló része egy ultraibolya fényforrást tartalmaz, egy nagynyomású higanygőzlámpát, és egy kollimátor rendszert. Az intenzitás sűrűséget egy fényintegrátor állítja be automatikusan a maszkillesztő berendezésen. A kapott lakkra kontrasztja a maszkhoz viszonyítva az alkalmazott lakk tulajdonságától függ.



12. ábra: A maszkillesztés és a megvilágítás

Előhívás

Az exponálással kialakított látszólagos képet az előhívó oldatba mártással, szelektív kioldással alakítjuk ki. Előhívás után a lakkal fedett és fedetlen területek határán alakulnak ki a lakk oldalfalak. Ezek meredeksége adja az ábra kontrasztját, minél meredekebb a fal, annál jobb a kontraszt és annál nagyobb a felbontóképesség. A forgalomban levő előhívó oldatok koncentrációk, így további hígításra kerülnek. Az előhívó oldat koncentrációja, a lakkréteg vastagsága és az exponáló dózis határozzák meg az előhívási időt. Az említett paramétereket úgy kell megválasztani, hogy az előhívás ideje 25-50sec között legyen. A kontraszt ilyen hívási idők mellett lesz optimális.

Beégetés

A művelet stabilizálja az előhívott mintázatot, kémiaiilag ellenállóvá teszi a polimer filmet, valamint eltávolítja az oldószer maradványokat.

A fotolakk film plasztikus folyásának mértéke a hőmérséklettől függ. A lakkábra magasság-szélesség arányától függően változik a lakkábra laterális mérete, bizonyos fokú stressz képződik a rétegben. Magasabb hőmérsékletű és hosszabb ideig tartó hőkezelés után nehezebb feloldani a lakkot az oldószerben.

A nem beégetett, vagy alacsony hőmérsékleten beégetett lakkréteget és maradványai általában az alábbi oldószerekben leoldhatók:

- aceton
- triklóetilén
- fenol alapú un. sztripperek

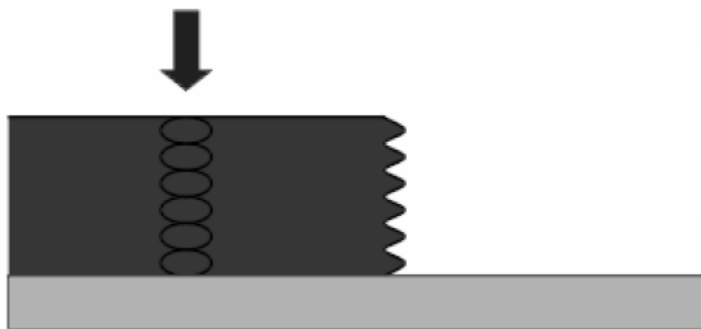
Magas hőmérsékletű beégetés esetén az alábbi oldási módszerek állnak rendelkezésre:

- N-metil-2pirolidon
- Füstölő salétromsav
- Plazmás eltávolítás O_2 plazmában

Lehetséges hibajelenségek a litográfiás lépések során

Diffrakció: Amennyiben az exponáláshoz használt fényforrás hullámhossza és a fotomaszk réstávolságai egy nagyságrendbe esnek, fellép a diffrakció jelensége. Ennek megfelelően pl. 400nm hullámhosszúságú fény és 800nm csíkszélesség esetén a fényelhajlás már 60° -os is lehet, s így jelentős alávilágítás jöhet létre.

Állóhullámeffektus: Monokromatikus fénnel való exponálásnál állóhullámok keletkeznek. A lokális intenzitás maximumok és minimumok hatására hullámos rezisztfalat kapunk (13. ábra). A hatást csökkenthetjük több hullámhosszat tartalmazó fényforrással vagy utóhőkezeléssel.



13. ábra: Állóhullámok hatása a kialakuló rezisztfalra

Nanoimprinting

A felbontás növelésének egy másik eszköze, olyan nm-es csíkszélességű mesterdarabok készítése, melyek segítségével a szelet felületére felvitt reziszt a mintázatot mechanikai úton, nyomtatás (imprinting) következtében veszi fel. A mester nyomóforma elkészítése történhet üveg vagy polimer alapú hordozóra pl. elektronlitográfia segítségével. A módszer lehetővé teszi nanoméretű vékonyréteg struktúrák kialakítását, mely akár tömegtermelésre, így az IC gyártás számára is hatékonyan alkalmazható.

A mérés menete

1. A hallgatók feladata egy Si hordozóra leválasztott termikus SiO₂ vékonyrétegben mintázat kialakítása
 - a. Hordozó dehidratálása
 - b. Lakk felvitele a hordozóra
 - c. Lakk szárítása (lakktapadás vizsgálata)
 - d. Maszkillesztés
 - e. Reziszt exponálása (túlexponálás hatásának vizsgálata)
 - f. Exponált lakk kioldása
 - g. Beégetés
 - h. Vékonyréteg marása
 - i. Reziszt eltávolítása
2. A vékonyréteg ábrakialakításakor megismert lépések felhasználásával sík öntőforma kialakítása PDMS csatornarendszer elkészítéséhez
 - a. Lakkábra kialakítása öntőformához
 - b. Rapid-Prototyping eljárással PDMS minta elkészítése
 - c. Az elkészített PDMS minta és az öntőforma lakkábrájának összehasonlítása, minősítése

Ellenőrző kérdések

1. Milyen fotolitográfiai képátviteli módszereket ismer?
2. Mi okozza a kontakt és proximity másolás felbontásbeli különbségét?
3. Milyen litográfiai technikákkal van lehetőség a felbontás növelésére?
4. Hogyan készülnek a fotomaszkok?
5. Sorolja fel a fotorezisztek legfontosabb tulajdonságait!
6. Sorolja fel a fotolitográfiai reziszttechnológia lépéseit!
7. Milyen hibajelenségek léphetnek fel a fotolitográfiai lépések során?
- 8.

Ajánlott irodalom

1. Mojzes Imre: Mikroelektronika és technológia
2. James D. Plummer: Silicon VLSI technology