

Framleiðsla smárása:

Lithography

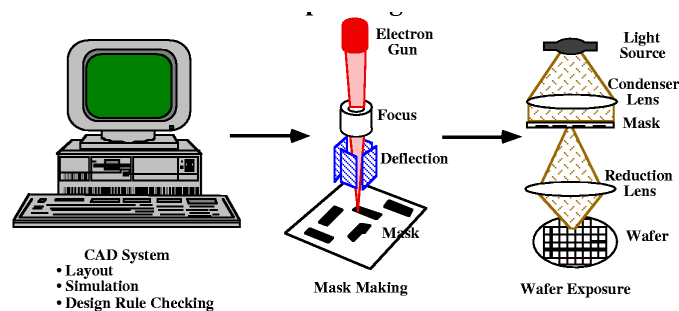
Kaflí 20

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

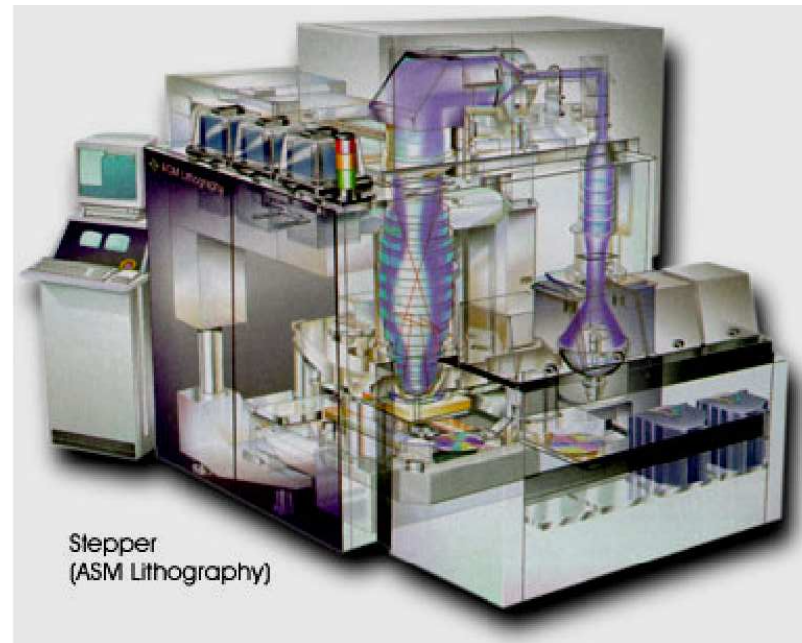
12. vika haust 2016

Lithography



- Lithography er ferlið þegar mynstur er flutt frá grímu til þunns lags, sem næmt er fyrir geislun, og liggur á hálfleiðarayfirborðinu
- Mynsturflutningurinn fæst með ætiferli sem fjarlægir valkvæmt þau svæði sem gríman skýldi ekki
- Sífelld er krafist betri upplausnar, lengri depth of focus og stærri ágeislunarflatar í ljóslithography
- Þessu hefur verið mætt með styttri bylgjulengd og nýjum ljósviðnámsefnum

Lithography



- Gjarnan eru notaðar bylgjulengdir á bilinu $0.2 - 0.4 \mu\text{m}$
- Hreinherbergi eru lýst með gulu ljósi því að ljósviðnámsefnin eru ekki næm fyrir bylgjulengdum ofan við $0.5 \mu\text{m}$

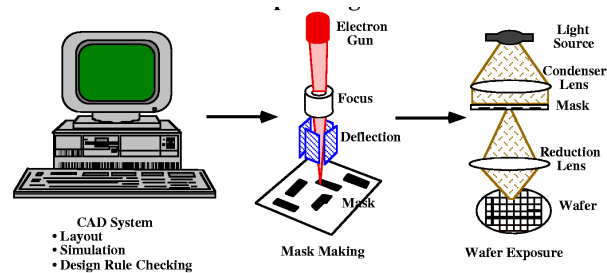
Lithography

Year of 1st DRAM Shipment	1997	1999	2003	2006	2009	2012
DRAM Bits/Chip	256M	1G	4G	16G	64G	256G
Minimum Feature Size nm						
Isolated Lines (MPU)	200	140	100	70	50	35
Dense Lines (DRAM)	250	180	130	100	70	50
Contacts	280	200	140	110	80	60
Gate CD Control 3σ (nm)	20	14	10	7	5	4
Alignment (mean + 3σ) (nm)	85	65	45	35	25	20
Depth of Focus (μm)	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5
Defect Density (per layer/ m^2) @ Defect Size (nm)	100 @ 80	80 @ 60	60 @ 40	50 @ 30	40 @ 20	30 @ 15
DRAM Chip Size (mm^2)	280	400	560	790	1120	1580
MPU Chip Size (mm^2)	300	360	430	520	620	750
Field Size (mm)	22x22	25x32	25x36	25x40	25x44	25x52
Exposure Technology	248n m DUV	248n m DUV	248n m or 193n m DUV	193n m DUV or ???	193n m DUV or ???	???
Minimum Mask Count	22	22/24	24	24/26	26/28	28

Lithography

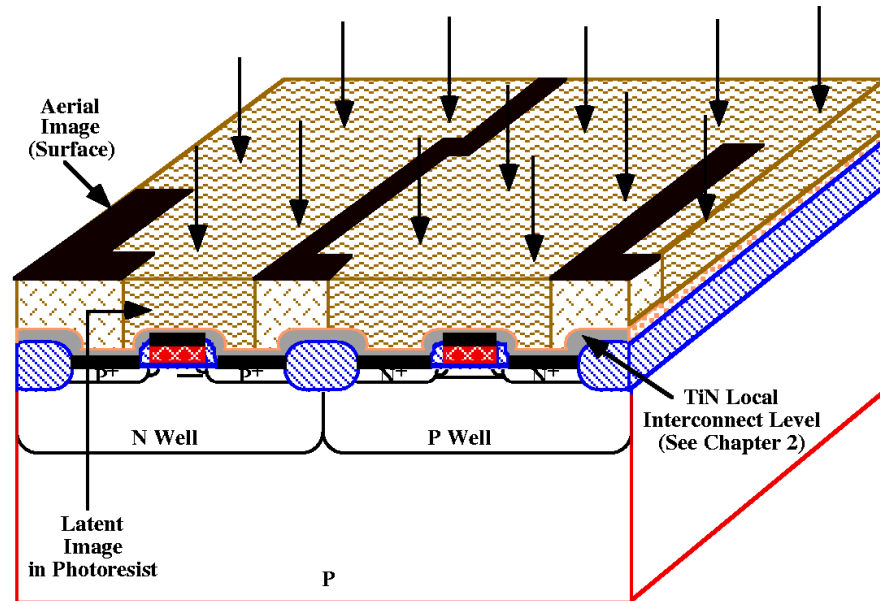
- **Lithography** er sennilega mikilvægasta tæknin sem beitt er við framleiðslu smárása
- Hin stöðuga smækkun
 - $0.7 \times$ smækkun á hverjum 3 árum
 - Placement nákvæmni $1/3$ af feature stærð
 - 35 % af heildar framleiðslukostnaði skífu felst í lithography ferlinu
 - ??? er mesti óvissuþátturinn um framhald skölunar

Lithography - grunn hugmynd



- Mynsturflutningurinn er byggður á þremur þáttum:
 - hönnun grímu
 - framleiðslu grímu
 - prentun á skífur
- Prentun skífunnar má skipta í þrjá hluta
 - Ljósgjafa
 - Lýsingu skífunnar (e. wafer exposure system)
 - Ljósviðnámsefni

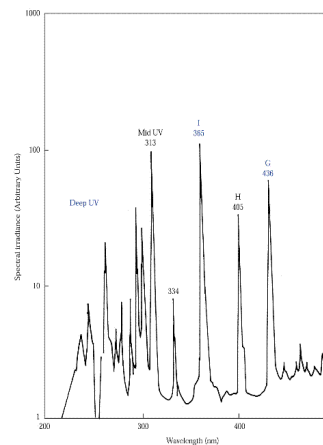
Lithography - grunn hugmynd



- Mynstrið flutt á myndflötinn með ljósgeislum
- Eftir situr 3-víð mynd sem er fengin með valkvæmri eyðingu viðnámslagsins

Ljósgjafar

- Í gegnum tíðina hafa kvikasilfurslampar verið notaðir
- Þeir gefa margar nothæfar litrófslínur þegar í þeim er myndað rafgas



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

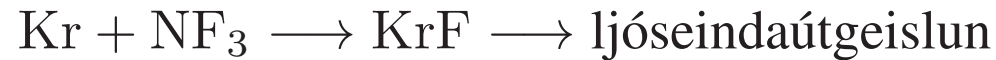
- Þá eru atóm örvuð í hærri orkustig sem gefa frá sér ljós af tilteknum bylgjulengdum þegar þau leita aftur í grunnorkustig

Ljósgjafar

- Þær línur sem mest eru notaðar eru
 - G - lína $\lambda = 436 \text{ nm}$
 - H - lína $\lambda = 405 \text{ nm}$
 - I - lína $\lambda = 365 \text{ nm}$
- I - línan er notuð fyrir $0.5 \mu\text{m}$ og $0.35 \mu\text{m}$ tækni

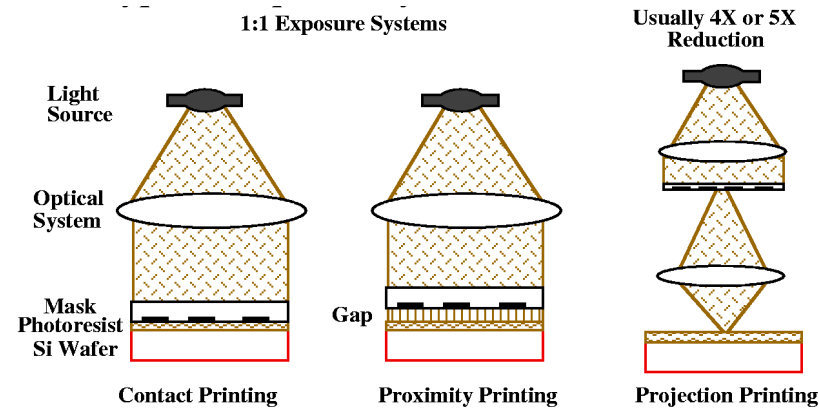
Ljósgjafar

- Bjartasti ljósgjafinn í UV eru excimer leysar



- Þær línur sem mest eru notaðar eru
 - KrF leysir $\lambda = 248 \text{ nm}$
 - ArF leysir $\lambda = 193 \text{ nm}$
- KrF leysir er notaður í $0.25 \mu\text{m}$ tækni
- Með minnkandi feature stærðum þarf styttri bylgjulengdir, λ og vandamál er að finna heppileg ljósviðnámsefni og linsur sem hleypa í gegn þessum bylgjulengdum

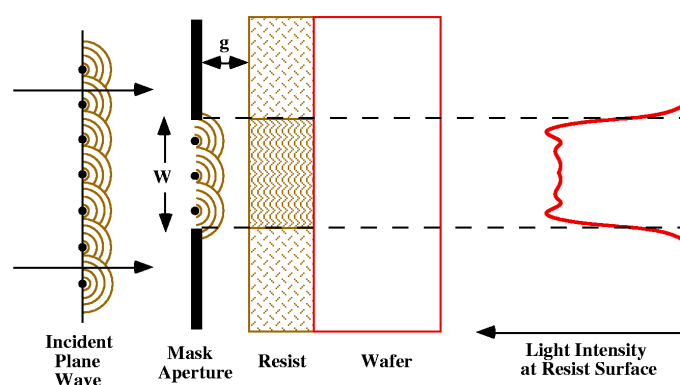
Ljósvarpar



- Með **snertiprentun** næst mesta upplausnin ($\sim 1 \mu\text{m}$) en veiluféttleiki vegna rykagna er óásættanlegur
- Með **nándarprentun** (e. proximity printing) er ekki auðvelt að flytja stærðir sem eru minni en nokkrir μm (nema með röntgen kerfum)
- Með **ljósvarpa prentun** (e. projection printing) má ná hærri upplausn og veiluféttleika er haldið í lágmarki - ráðandi tækni

Snerti- og nálægðar kerfi

- Við nándarprentun er haft 10 – 50 μm bil á milli skífunnar og grímunnar
- Þetta litla bil hefur áhrif á bogunarmynstur ljóssins og víxlarákir (e. fringes) myndast og ljós berst til skýldra svæða undir grímunni



- Snerti- og nálægðar kerfi vinna í nærsviði og gefa Fresnel bogunarmynstur

Snerti- og nálægðar kerfi

- Setjum g sem bilið á milli grímunnar og viðnámslagsins
- Fresnel bylgjubeygja er það þegar

$$\lambda < g < \frac{W^2}{\lambda}$$

þar sem W er þvermál ljósopsins

- Innan þessa sviðs eru minnstu greinigæði

$$\text{CD} = W_{\min} \approx \sqrt{\lambda g}$$

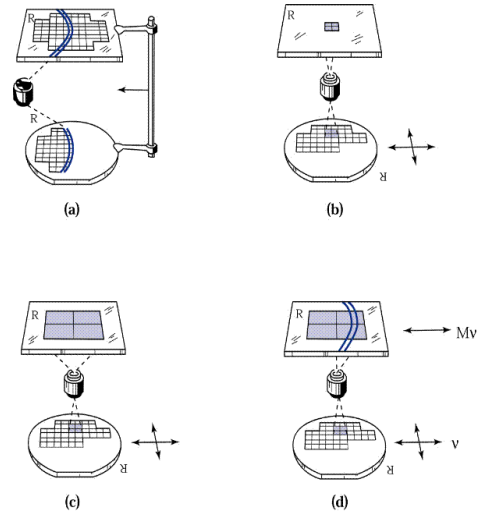
þ.a. ef $g = 10 \mu\text{m}$ og I-línu ljósgjafi ($0.365 \mu\text{m}$) er notaður þá er $\text{CD} \approx 2 \mu\text{m}$ og fyrir $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ og $g = 50 \mu\text{m}$ er $\text{CD} \approx 4.5 \mu\text{m}$

- Upplausnin er gjarnan $2 - 5 \mu\text{m}$
- Fyrir gefna fjarlægð getur rykögn af stærð g eyðilagt grímuna

Ljósvarpar

- Með því að varpa myndinni á viðnámsefnið á skífunni má hafa grímuna í nokkurra cm fjarlægð frá viðnámsefninu
- Til að auka upplausn er aðeins lýst á lítinn hluta skífunnar í einu
- Þessi litla mynd er skönnuð eða skrefuð yfir skífuna til að þekja allt yfirborðið
- Fyrstu vörpunarkerfin voru 1:1 kerfi framleidd af Perkin-Elmer fyrir rúmum 20 árum
- Grímurnar voru þá jafnstórar skífunum og verða því erfiðari í framleiðslu er skífunar stækka og tólin verða smærri
- Flestir varpar í dag minnka myndina $2 \times -5 \times$ sem gerir framleiðslu gríma mun auðveldari

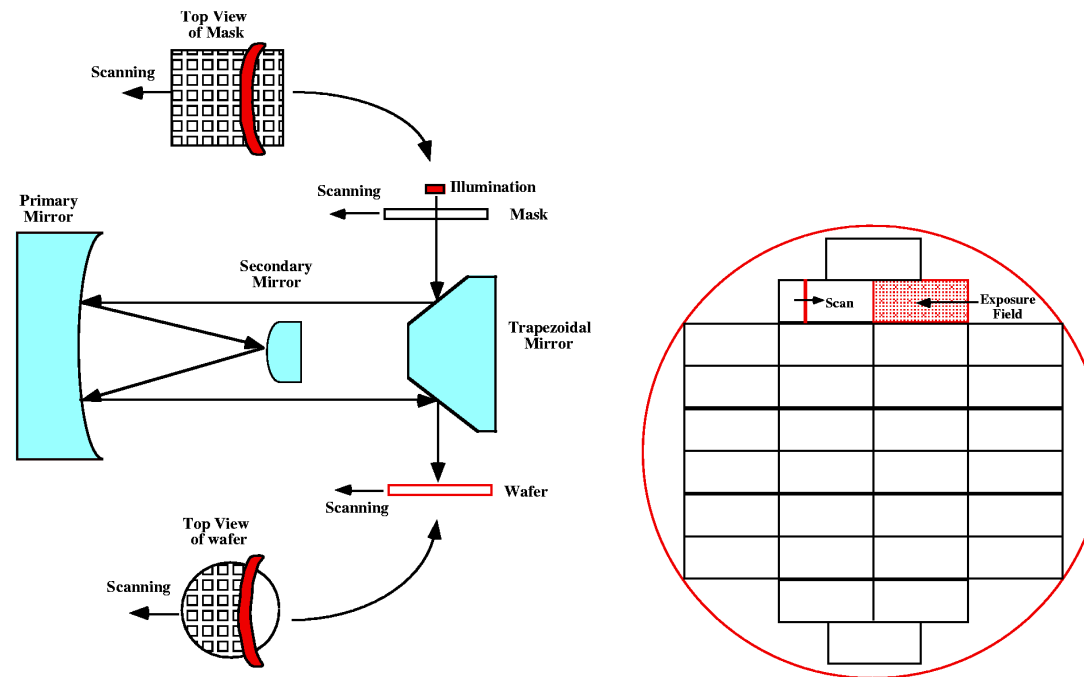
Ljósvarpar



*Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.*

- Mynd (a) sýnir skönnun
- Mynd (b) sýnir 1:1 skönnun
- Mynd (c) sýnir M:1 minnkun skref og endurtekningu
- Mynd (d) sýnir M:1 minnkun skref og skönnun

Ljósvarpar



- Flestir nútíma varpar skrefa og skanna
- Með því minnkar svæðið sem lýst er á í einu og vanda má betur til linsukerfisins

Ljósvarpar

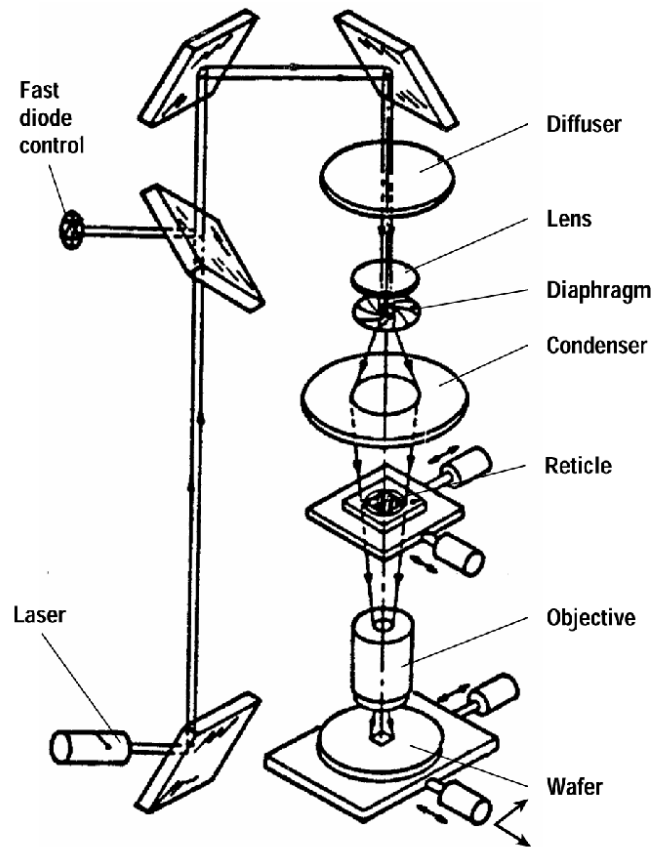


Fig 2 Twin Scan KrF
Lithography from ASML

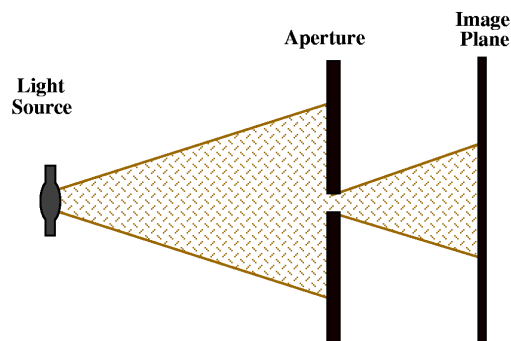
- Dæmigerðir ljósvarpar smækka við vörpun ($2 \times -5 \times$) og skrefa og endurtaka eða skrefa og skanna
- Þeir afkasta 50 skífum á klukkustund og kosta 5 - 10 milljón dollara

Ljósvarpar

Skrefari með excimer leysi

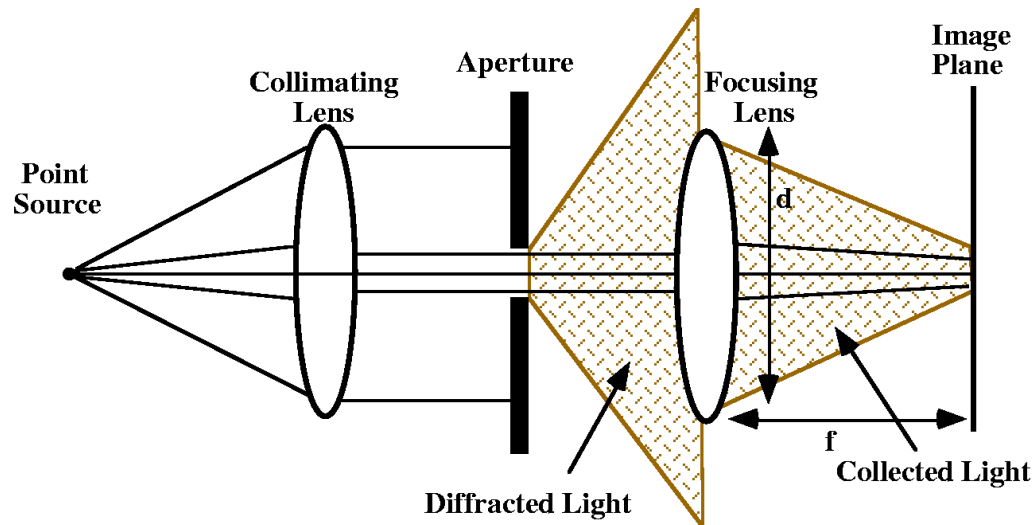


Ljósfræði



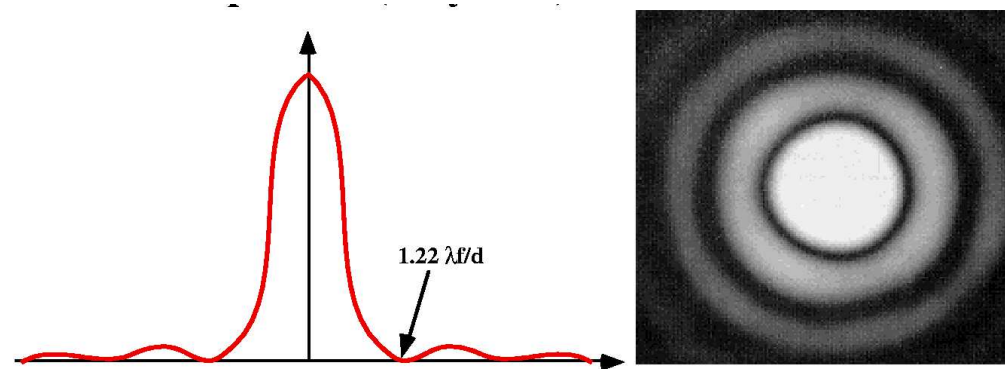
- Gert er ráð fyrir að ljós ferðist eftir beinum línunum, **geislaslóðun** (e. ray tracing)
- Þetta er rétt svo lengi sem víddir eru stærri en λ
- Við smærri víddir eru áhrif bogunar (e. diffraction) ráðandi
- Ef ljósopið er af svipaðri stærð og λ dreifist ljósið þegar það hefur farið um ljósopið - því smærra sem ljósopið er þeim mun meira dreifist það

Ljósfræði



- Ef við viljum varpa ljósopinu á myndflöt (ljósviðnámslagið) má safna ljósinu með linsu og skerpa (e. focus) það á myndflötinn
- Endanlegt þvermál linsunnar þýðir að eitthvað af upplýsingum tapast (hátíðni þættir)

Ljósfræði

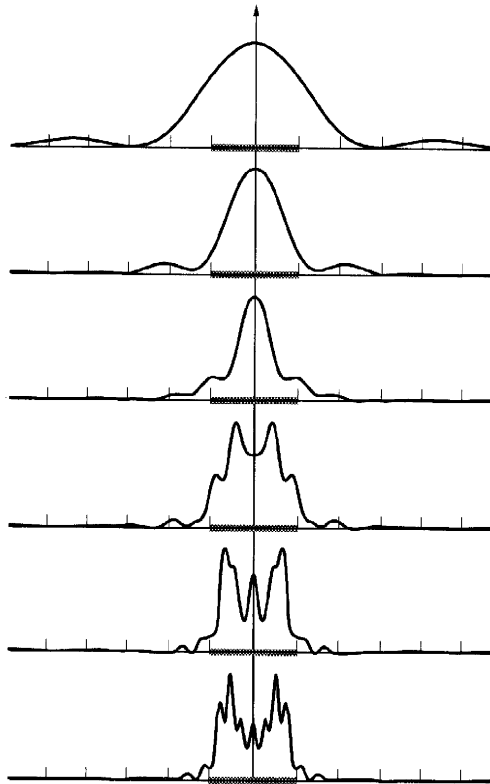


- Einfallt dæmi er myndin sem mynduð er með litlu hringlaga ljósopi (Airy diskur)
- Athugið að punktur er aðeins myndaður ef $\lambda \longrightarrow 0$, $f \longrightarrow 0$ eða $d \longrightarrow \infty$

Ljósfræði

- Bognunarmynstri (bylgjubeygju) (e. diffraction) er venjulega lýst í tveimur marktilfellum:
 - Fresnel bognunarmynstur - nær sviðs
 - Fraunhofer bognunarmynstur - fjær sviðs
- Fresnel bognunarmynstur kemur fram nærri ljósopinu og Fraunhofer fjarri því
- Styrkur rafsviðs í bylgjumynstri Fraunhofer svarar til Fourier vörpunar innmerkisins

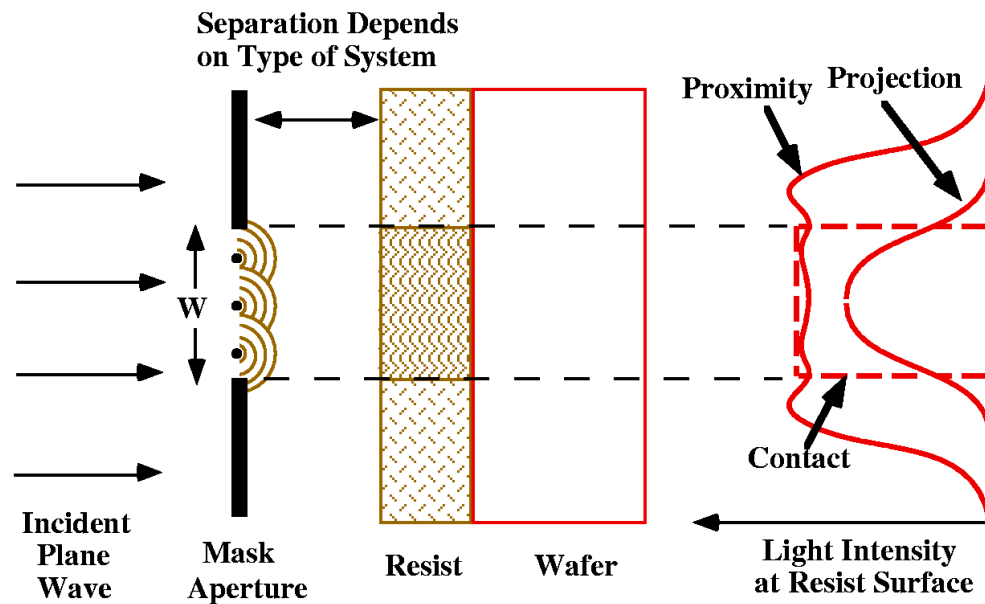
Ljósfræði



- Bognunarmynstur sem fall af fjarlægð frá rauf, Fresnel bognunarmynstur neðst og Fraunhofer efst

Ljósfræði

- Fraunhofer bognunarmynstur er mest notaða tæknin fyrir ljósvarpa (e. projection system)

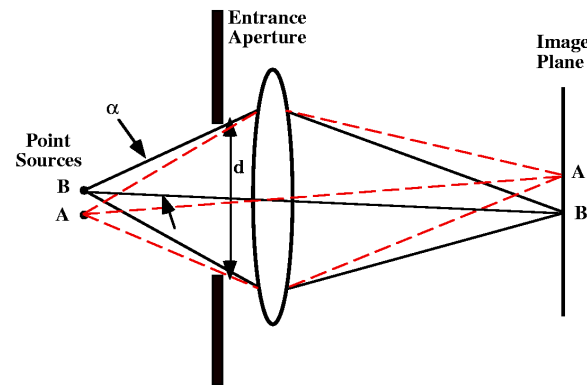


- Samanburður á snerti -, nálægðar - og vörpunarprentun

Ljósfræði

- Hæfni ljósvarpa (e. performance) er lýst með
 - greinigæðum (e. resolution)
 - depth of focus
 - sjónarhorn (e. field of view)
 - birtuskil (e. contrast) (modulation transfer function (MTF))
 - hve nákvæmlega má stilla eftirkomandi grímu með tilliti til áður komins mynsturs (e. alignment)
 - framleiðni (e. throughput) - sem er mælikvarði á hve margar skífur má lýsa á hverri klukkustund fyrir gefin fjölda gríma

Ljósfræði



- Gerum nú ráð fyrir ljósvörpuninni hér að ofan
- Rayleigh stakk upp á að heppilegt viðmið fyrir greinigæði væri að miðja punktlindar lægi á fyrstu lægð Airy mynstursins
- Með þessari skilgreiningu fæst

$$R = \frac{0.61\lambda}{n \sin \theta}$$

Ljósfræði

- NA lýsir hæfni linsunnar til að safna bylgjubeygðu ljósi

$$R = \frac{0.61\lambda}{\text{NA}} = k_1 \frac{\lambda}{\text{NA}}$$

þar sem k_1 er stuðull sem ræðst af lithography kerfinu og eiginleikum viðnámsefnis, gjarnan á bilinu 0.6 – 0.8

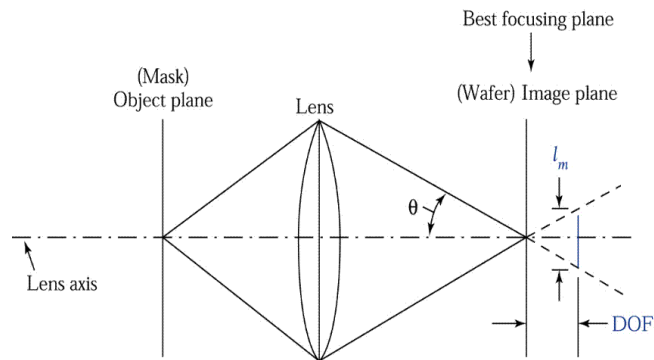
- Ljósop linsunnar er samkvæmt skilgreiningu

$$\text{NA} \equiv n \sin \theta$$

þar sem n er brotstuðull myndmiðils (venjulega er $n = 1$)

- Greinigæði má því auka með
 - minnka bylgjulengdina λ
 - auka ljósopið NA

Ljósfræði



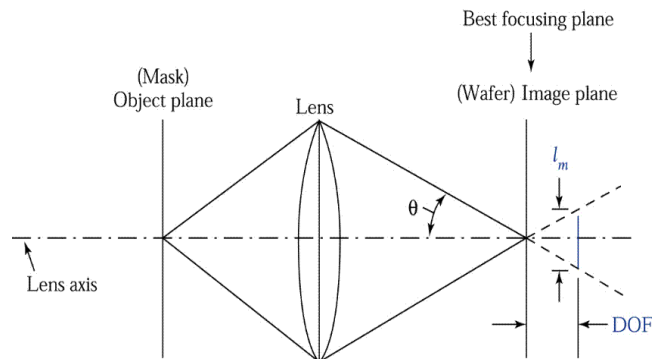
Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Hafa ber í huga að aukið ljósop dregur úr depth of focus

$$\text{DOF} = \pm \frac{R/2}{\tan \theta} \approx \pm \frac{R/2}{\sin \theta} = \pm k_2 \frac{\lambda}{(\text{NA})^2}$$

þar sem k_2 er ákvarðaður með tilraunum

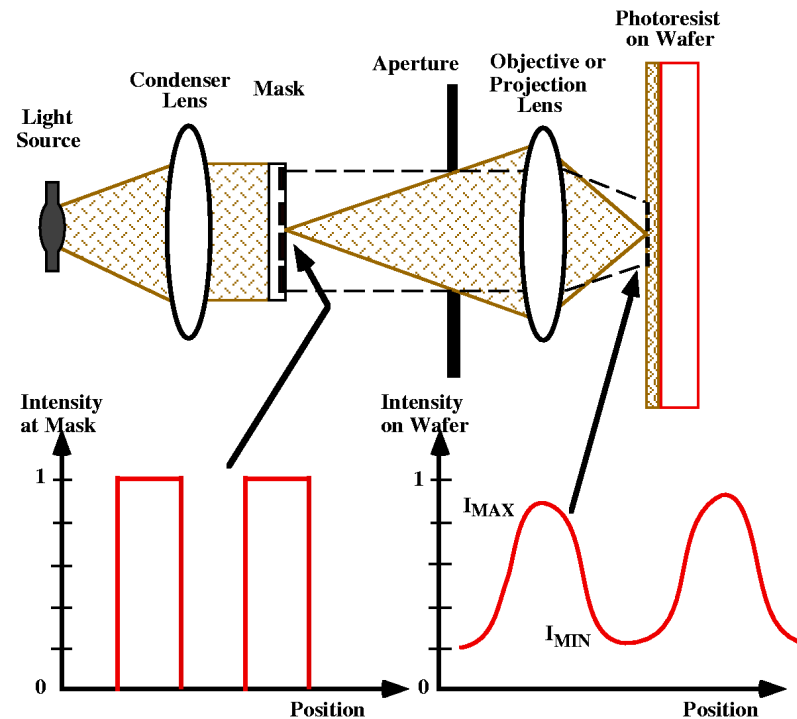
Ljósörpun



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Þetta er ástæðan fyrir því að fremur er leitast við að stytta bylgjulengd fremur en að auka ljósopið
- Fyrir lýsingarkerfi (e. exposure system) 248 nm línu (KrF) með $NA = 0.6$ fæst upplausn upp á $\approx 0.3\mu\text{m}$ ($k_1 = 0.75$) og DOF sem er $\pm 0.35\mu\text{m}$ ($k_2 = 0.5$)

Ljósörpun - MTF



- Þegar fjallað er um greinigæði er venjulega verið að ræða um röð lína og bila á milli þeirra, raufargler eða ljósgreiðu (e. diffraction grating)

Ljósvörpun - MTF

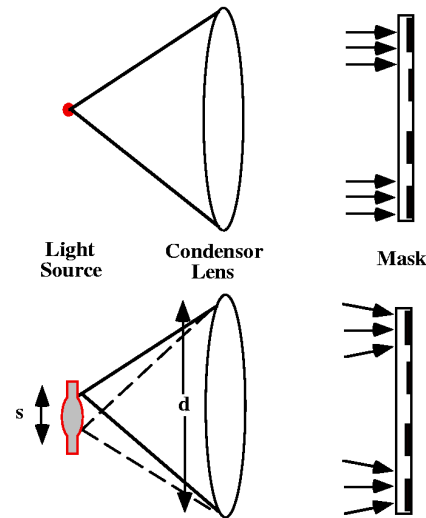
- Gert er ráð fyrir grímumynstri sem samanstendur af lotubundnu neti (lína og bil) með jöfnu línubili b
- Ljósstyrkur í miðju dökku línanna er táknaður með I_{MIN} og undir miðju björtu línanna með I_{MAX}
- Þá eru skilgreind birtuskil (e. contrast) (modulation transfer function (MTF))

$$\text{MTF} = \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}}$$

sem er fall af feature stærð

- MTF er þannig hlutfall mótunar við skífuna og við grímuna
- MTF er fall af lotu netsins $\nu = 1/2b$ og ljósopinu NA og samheldni ljóssins

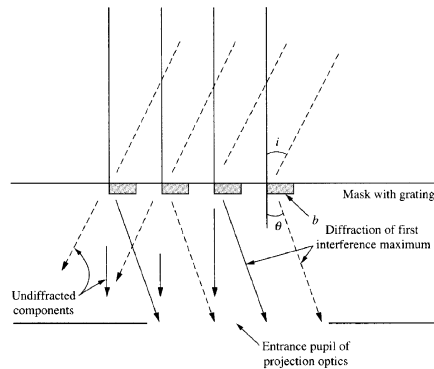
Ljósvörpun - samheldni



- Raunverulegir ljósgjafar eru ekki punktlindir
 - Ljósið sem lendir á grímunni eru ekki planbylgjur
- Samheldni (e. coherence) kerfisins er skilgreind með

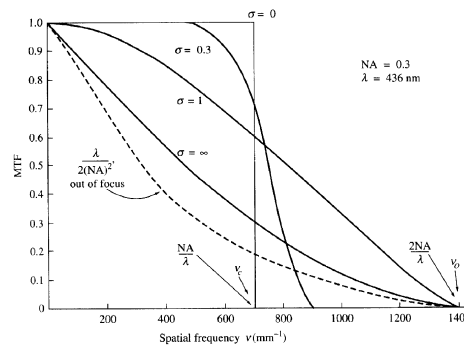
$$\sigma = \frac{\text{þvermál ljósgjafa}}{\text{þvermál safnlinsu}} = \frac{s}{d} = \frac{NA_{\text{safnlinsa}}}{NA_{\text{varpi}}}$$

Ljósvörpun - samheldni



- Bognun samheldins og ósamheldins ljóss frá ljósgreiðu
- Heilu línurnar sýna planbylgjur $\sigma \rightarrow 0$ sem falla hornrétt á grímuna
- Sá hluti ljóssins sem ekki verður fyrir bognun inniheldur engar upplýsingar um ν
- Þessar upplýsingar eru eingöngu í þeim hluta ljóssins sem verður fyrir bognun

Ljónsvörpun - samheldni



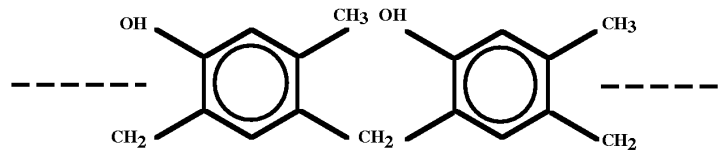
- Myndin sýnir mótun ljósstyrks sem fall af lotu fyrir mismunandi gildi á σ með 0.3 NA linsu
- Algeng gildi eru $\sigma \approx 0.5 - 0.7$ í nútíma kerfum
- Þegar $\sigma \rightarrow 0$ nálgumst við samheldna lýsingu og þegar $\sigma \rightarrow 1$ ósamheldna
- Ef samheldnin er fullkomin $\sigma = 0$ þá fellur MTF skarpt við Rayleigh greinigæði

Ljósviðnámsefni

- Ljósviðnámsefni eru ýmist jákvæð eða neikvæð, eftir því hvernig þau bregðast við ljósi
- Fyrir jákvætt ljósviðnámslag verða álýstu svæðin uppleysanlegri og auðveldara er að fjarlægja þau við framköllun
- Fyrir neikvætt viðnámsefni verður álýsta lagið minna uppleysanlegt og andhverfa grímunnar situr eftir
- Ljósviðnámslagið er úr lífrænum fjölliðum sem er snúið niður á (e. spun onto) skífur og forbakaðar til að mynda 0.5 – 1 μm þykka húð
- Diazonaphthoquinone eða DNQ ljósviðnám er oftast notað fyrir línur G og I

Ljósviðnámsefni

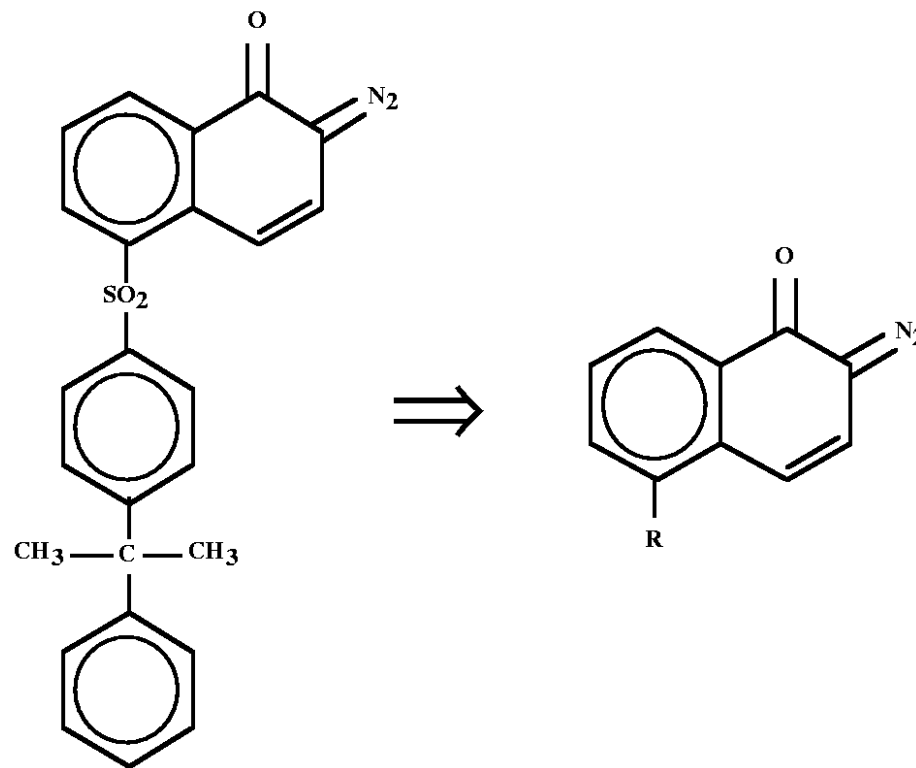
- G-línu og I-línu ljósviðnám er samsett úr þremur þáttum
 - Óvirk kvoða (e. resin)
 - Ljósnaemt efni (e. Photoactive compound (PAC))
 - Leysiefni (e. solvent) - til að stilla af seigju vökvans



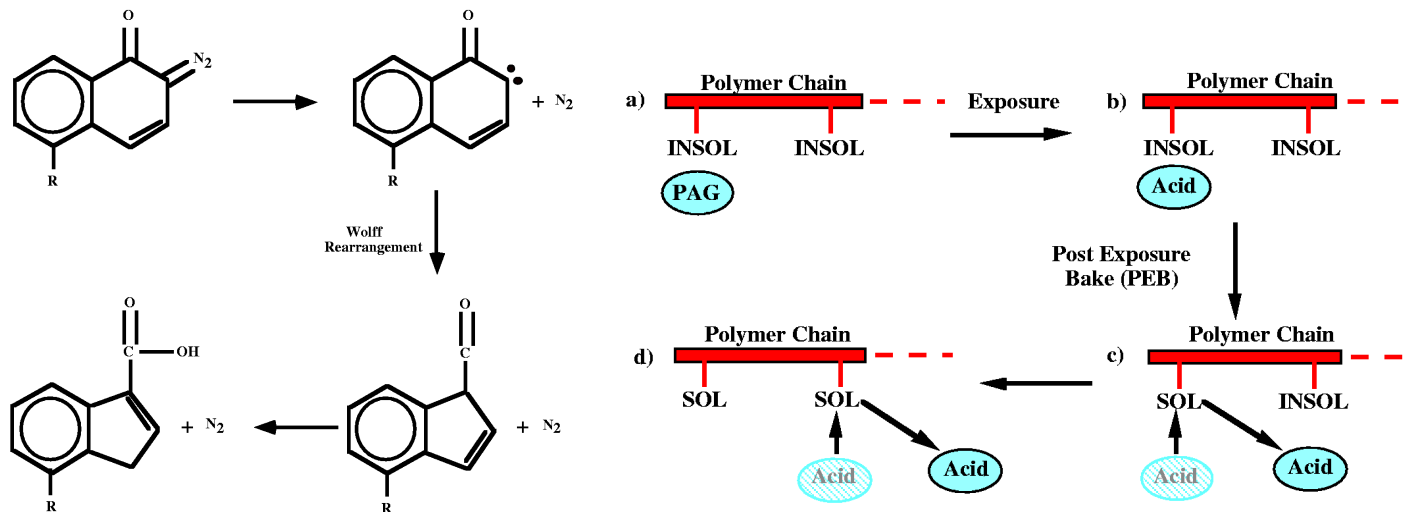
- Grunn kvoðan er novolac löng fjölliða sem samanstendur af kolvetnishringjum með 2 metýl hópum og 1 OH hóp tengdum
- Ljósnaema efnið (PAC) í DNQ viðnámsefni er oft diazoquinones
- Diazoquinones eru óuppleysanleg í dæmigerðum framköllunarvökvum

Ljósviðnámsefni

- Eftir að lýst hefur verið á efnið breytist PAC þátturinn í DNQ í karboxýl sýru sem er uppleysanleg í framkallaranum

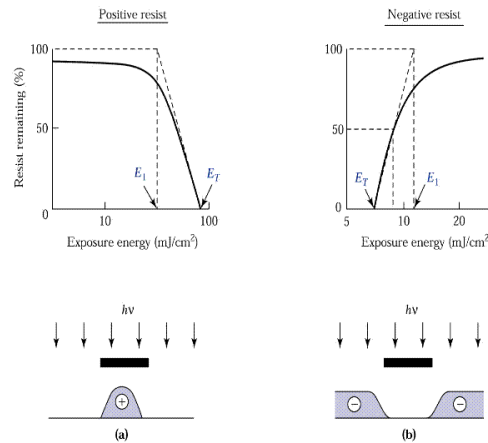


Ljósviðnámsefni



- Fyrir útfjólublátt ljós (þ.e. 248 og 193 nm) er ekki hægt að nota venjulegt ljósviðnámsefni - það þarf afar langan lýsingartíma
- Þá er beitt efnamögnun (e. chemical-amplified resist (CAR))

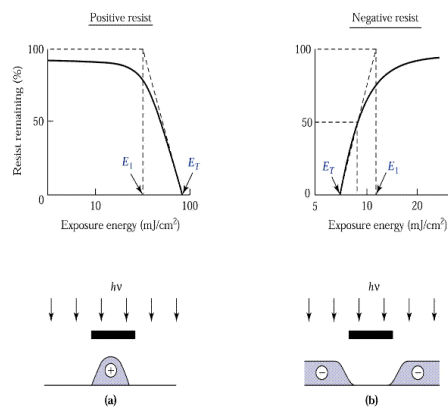
Eiginleikar ljósviðnámsefnis



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Myndin sýnir dæmigerða svörunarferla fyrir lýsingu á jákvætt og neikvætt ljósviðnámsslag
- Grafið sýnir hlutfall ljósviðnámsslags, sem eftir situr þegar lýst hefur verið og framkallað, sem fall af ljósorku

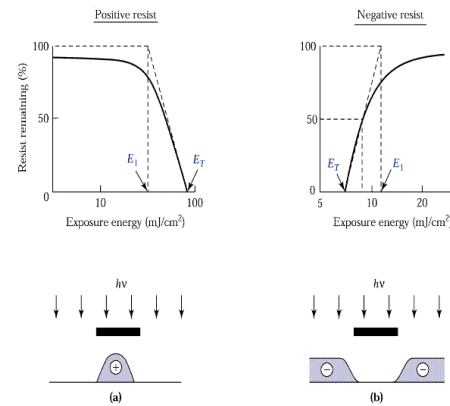
Eiginleikar ljósviðnámsefnis



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Þegar ljósorkan er aukin eykst uppleysanleiki upp að þröskuldsorku E_T þar sem viðnámslagið er fullkomlega uppleysanlegt
- Næmni jákvæðs viðnámslags er skilgreint sem orkan sem nægir til að fá fullkominn uppleysanleika á lýsta svæðinu

Eiginleikar ljósviðnámsefnis



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Neikvætt viðnámslag er fullkomlega uppleysanlegt í framkallara ef lýst er með ljósorku sem er lægri en E_T
- Næmni neikvæðs ljósviðnámslags er skilgreint sem orkan sem þarf til að halda 50 % af upphaflegri þykkt viðnámslagsins í álýsta svæðinu

Eiginleikar ljósviðnámsefnis

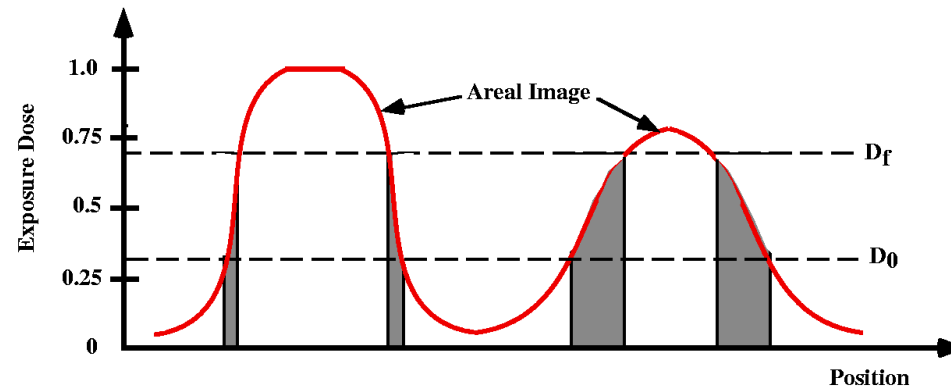
- Það er einkum tvennt sem einkennir eiginleika ljósviðnámsefnis
 - Birtuskil (e. contrast)
 - Critical modulation transfer function (CMTF)

- Birtuskil eru skilgreind

$$\gamma = \frac{1}{\log \left[\frac{E_T}{E_1} \right]}$$

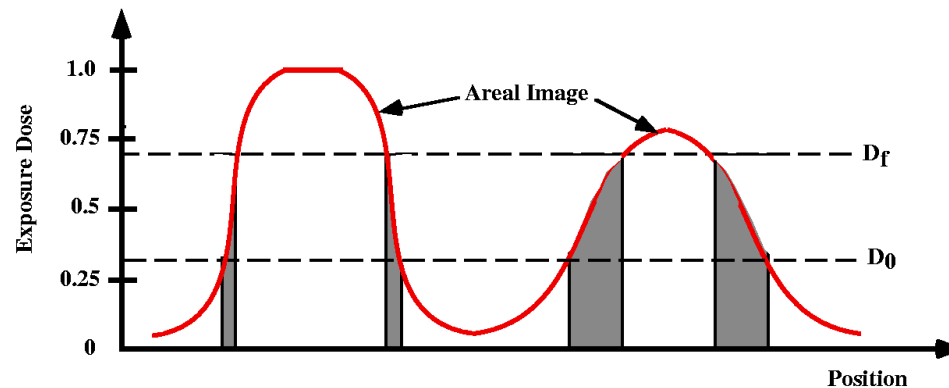
- Dæmigerð gildi fyrir G- og I-línu viðnámslag er $\gamma \approx 2 - 3$ og $E_T \approx 100 \text{ mJ/cm}^2$
- DUV viðnámsefni hafa mun hærri gildi $\gamma \approx 5 - 10$ og $E_T \approx 20 - 40 \text{ mJ/cm}^2$

Ljósviðnámsefni



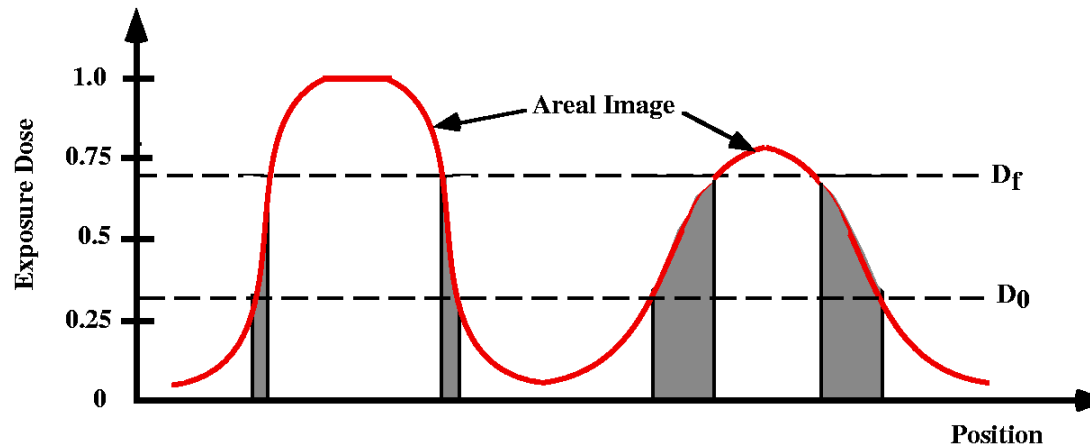
- Saman hafa skuggamynstrið (e. aeral image) og birtuskilin áhrif á gæði
- Öll svæði sem geisluð eru með ljósstyrk sem er hærri en E_T leysast fullkomlega upp við framköllun
- Ef ljósstyrkur er lægri en E_1 leysist ljósviðnámslagið ekki upp í framkallaranum

Ljósviðnámsefni



- Á milli E_T og E_1 leysist ljósviðnámslagið upp að einhverju leyti
- Vinstri hlið myndarinnar sýnir skarpt skuggamynstur og bratta viðnámsbrún
- Hægri myndin sýnir slakari skuggamynstur og tilsvarandi aflíðandi brún í viðnámsefni

Ljósviðnámsefni

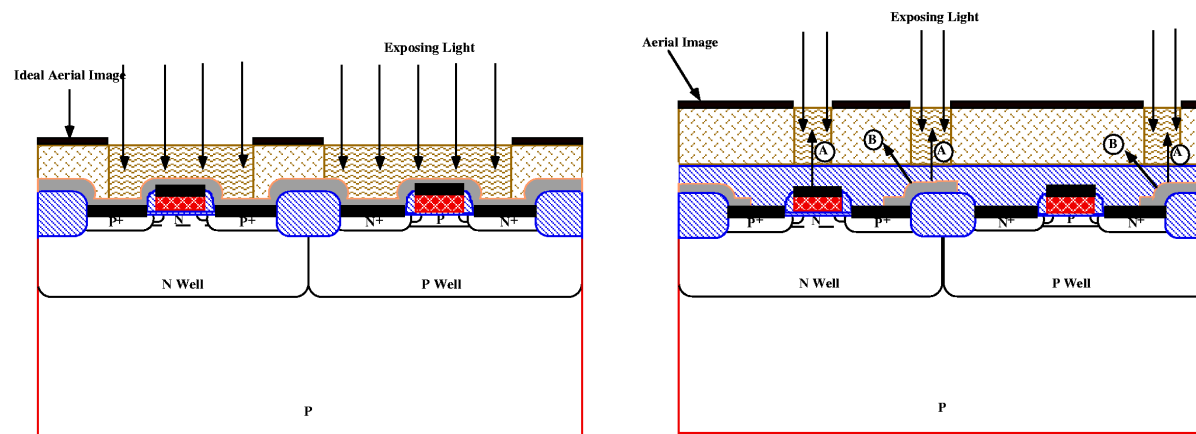


- Á sama hátt og MTF var skilgreint fyrir ljóskerfi er CMTF skilgreint fyrir viðnámsefnið

$$\text{CMTF}_{\text{viðnám}} = \frac{E_T - E_1}{E_T + E_1} = \frac{10^{1/\gamma} - 1}{10^{1/\gamma} + 1}$$

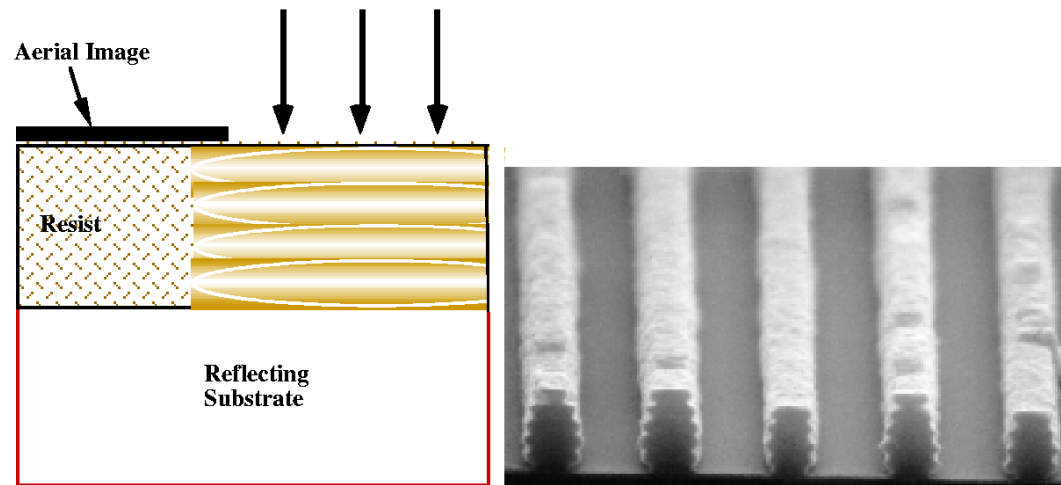
- Almennt þarf $\text{CMTF} < \text{MTF}$ til að viðnámslagið gefi skuggamynstrið

Ljósviðnámsefni



- Þykkt ljósviðnámsefnis getur verið breytileg yfir skífuna
- Þetta getur valdið yfirlýsingu á sumum svæðum og þar með breytilegri línubreidd

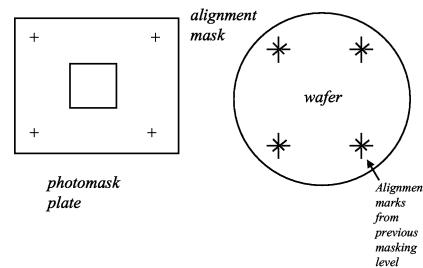
Ljósviðnámsefni



- Speglandi yfirborð neðan við viðnámslagið geta valdið speglun og standbylgjum sem skerða upplausn
- Stundum má minnka þessi áhrif með andspeglun (gegnskinshúð) (e. antireflecting coating (ARC))

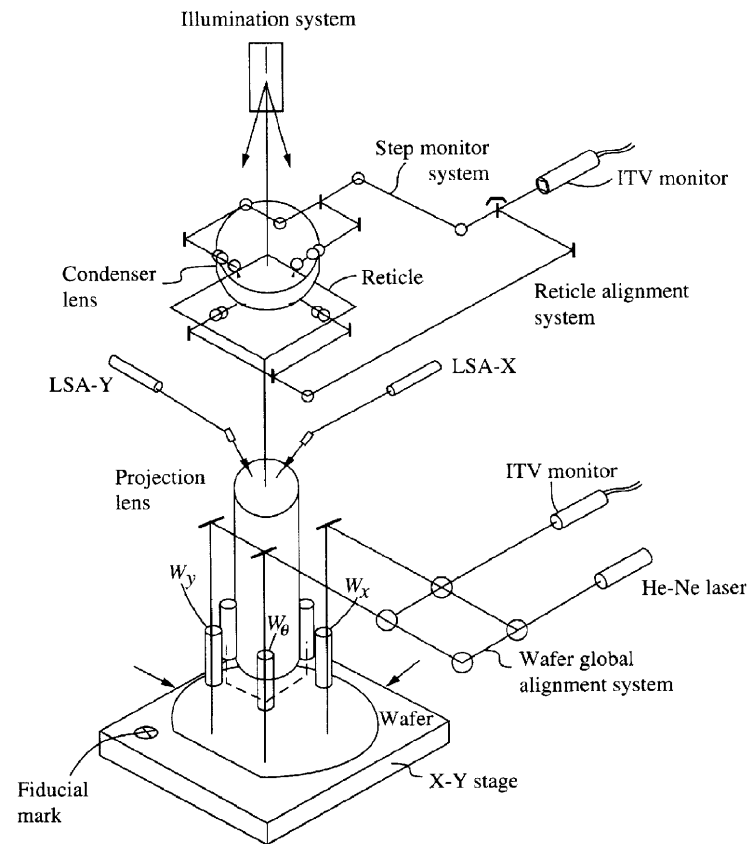
Grímur

- Grímur þær sem notaðar eru í framleiðslu smárása eru myndaðar í krómlag á fused silica undirlagi
- Mynstrið á hverri grímu svarar til eins lags í smárása hönnun
- Ljósvörpunarkerfi minnkar myndina niður á skífuna



- Gríman hefur oftast eitt eða fleiri eins mynstur til að stilla megi grímur af fyrir mismunandi lög
- Gjarnan eru notaðar 20 – 25 lög af grímum til að mynda fullkomna smárás

Grímur

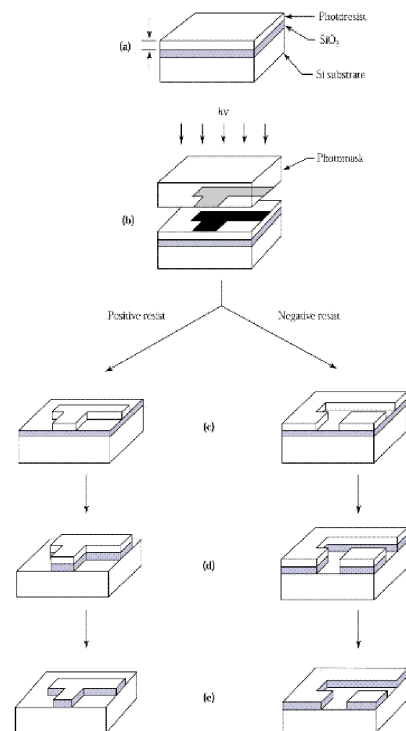


- Kerfi til að stilla af skífu og grímu í skrefara

Grímur

- Gríman er gerð með því að lýsa á eða skrifa rásamynstrið í viðnámslag sem er lagt yfir krómlagið
- Viðnámslagið er framkallað til að mynda mynstrið og síðan er ætt í krómlagið í gegnum mynstraða viðnámslagið
- Að lokum er viðnámslagið hreinsað af
- Eftir skoðun er gríman vernduð með þunnri pellicle þynnu
- Vikmörk (e. tolerance) gríma eru mældir í tugum nanómetra, veilustærðir í hundruðum nanómetra og gagnamagn mynstursins í gígabitum

Grímur - mynsturflutningur



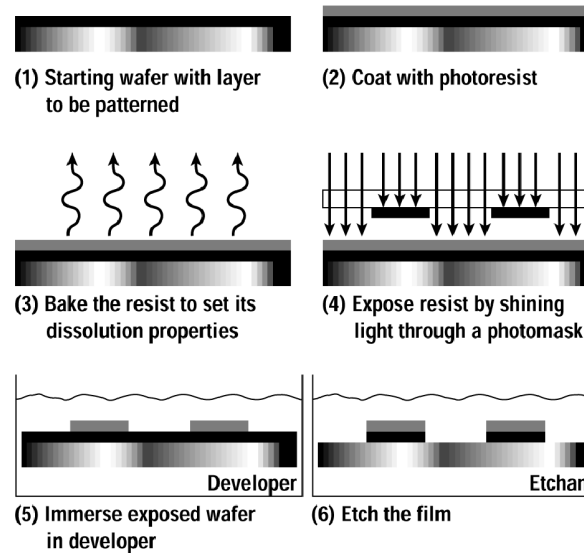
Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Myndin sýnir flutning á mynstri frá grímu niður á kísilskífu sem hefur SiO₂ einangrandi lag

Grímur - mynsturflutningur

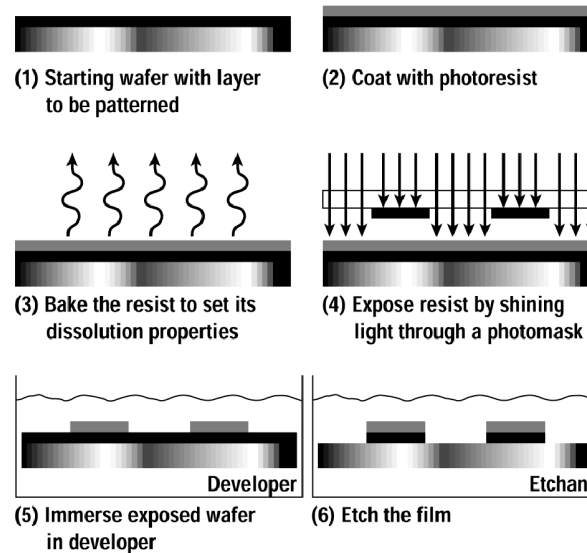
- Fyrst er yfirborð kísilskífunnar meðhöndlað þannig að í stað þess að vera vatnssækið (e. hydrophilic) verði það vatnsfælið (e. hydrophobic)
- Oftast er þetta gert með hexa-methylene-disiloxane (HMDS)
- Þá er 2 – 3 cc af vökvakenndu viðnámsefni sprautað á miðju skífunnar og henni hraðað upp í snúning, 1000 – 10000 rpm sem er viðhaldið í um 30 s
- Þetta er gert til að ná einsleitri húð 0.5 – 1 μm þykkri
- Þá er skífan bökuð við 90 – 120°C í 60 – 120 s til að eyða leysiefninu úr viðnámsefninu og auka viðloðun
- Þessu næst er skífan stillt af með tilliti til grímunnar og lýst á skífuna (dæmigert 150 mJ/cm²)

Grímur - mynsturflutningur



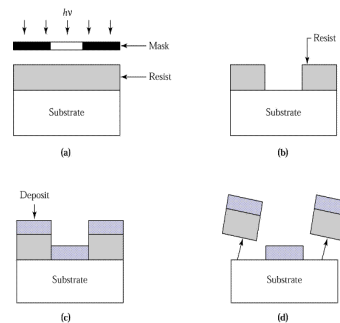
- Þá er skífan stundum bökuð við 100°C í 10 mín til að minnka áhrif standbylgja
- Viðnámslagið er þá framkallað í framköllunarvökva og skífan hreinsuð og þurrkuð

Grímur - mynsturflutningur



- Eftir framköllun er skífan bökuð $\sim 100 - 180^\circ\text{C}$ til að auka viðloðun áður en æting á opna svæðinu í viðnámslaginu er frakvæmd
- Að lokum er allt viðnámsefnið fjarlægt

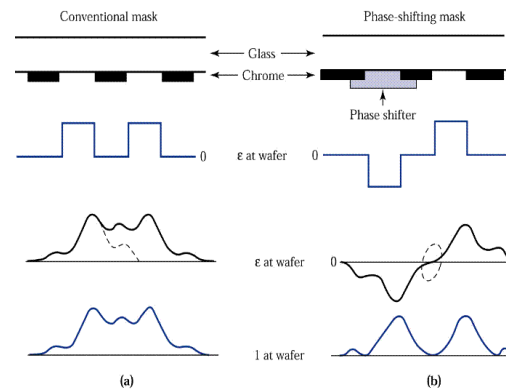
Grímur - myndurflutningur



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Ein leið til myndurflutnings er liftoff - ferlið
- Jákvætt viðnámslag er notað og í það myndað myndur
- Þá er ræktuð þunn húð á yfirborðið og viðnámslagið - þykktin verður að vera minni en þykkt viðnámslagsins
- Þá er viðnámslagið fjarlægð og þeir hlutar húðarinnar sem liggja á því

Grímur - myndurflutningur



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Mikilvæg leið til að auka upplausn er phase-shifting mask (PSM)
- Fyrir grímu sem hleypir í gegn hefur rafsviðið sama styrk fyrir öll ljósopin
- Bylgjubognun og takmörkuð upplausn dreifa þessu rafsviði við yfirborð skífunnar (brotin lína)

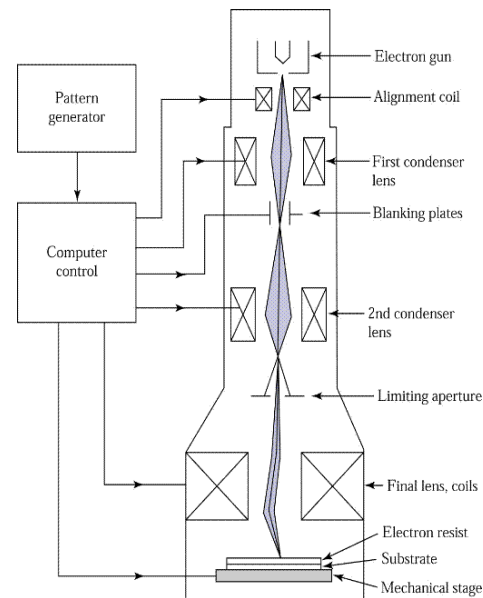
Grímur - mynsturflutningur

- Víxlhrifin milli bylgja frá nálægum ljósopum breytir sviðinu á milli ljósopa
- Styrkurinn I er í réttu hlutfalli við \mathcal{E}^2
- Fasabreytilag á næsta ljósopi við hliðina sem snýr rafsviðinu veldur því að styrkurinn við grímuna er óbreyttur en rafsviðið við skífuna styttist út
- Myndin sem varpað er nálægt hvor annarri eru aðskildar
- 180° fasabreyting verður þegar gegnskinslag af þykkt $d = \lambda/(2(n - 1))$ þekur ljósopið

Ný tækni í lithography

- Til að varpa mynstri fyrir minni tól ($< 0.1 \mu\text{m}$) þarf nýja tækni og sú tækni byggir ekki engilega á ljósfræði:
 - rafeindageislar
 - afar útfjólublá geislun (e. extreme ultra violet (EUV))
 - nálægðar röntgen (e. X-ray) lithography
 - jónageislar

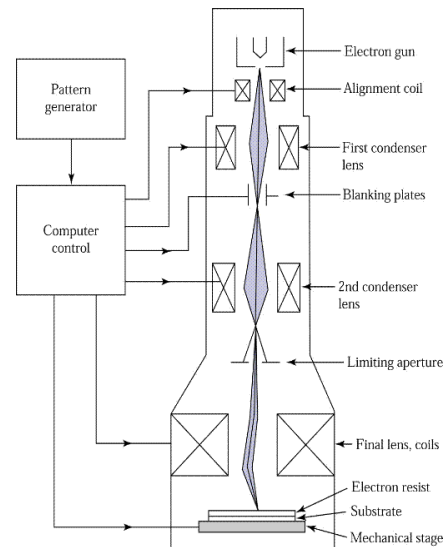
Rafeindageisli



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Skerpa má rafeindageisla niður í afar lítil þvermál
- Slíka rafeindageisla má auðveldlega skanna og staðsetja nákvæmlega

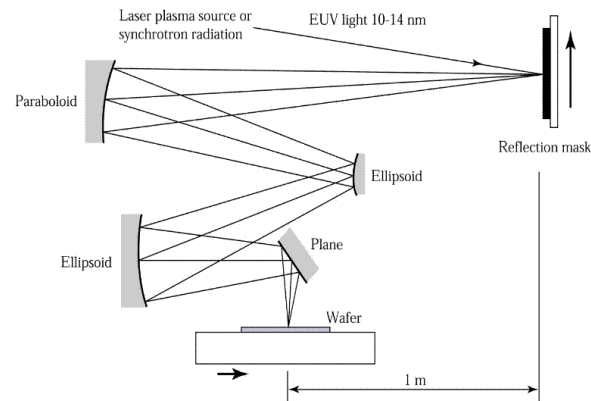
Rafeindageisli



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Mynda má hluti sem eru minni en $0.1 \mu\text{m}$
- Megin gallinn er að þessi aðferð er afar seinleg
- Fyrir 64 Mb DRAM tekur 2 klst að rita hverja grímu fyrir 60 flögur á skífu

EUV - kerfi



Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

- Hér er ljóseindaorkan um 100 eV og bylgjulengdir 10 – 15 nm (soft X-rays)
- Aðeins speglun
 - vantar hæfilega ódýra lind
 - speglar eru erfiðir í framleiðslu og nýtni ekki nægjanlega góð

Heimildir

- [1] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and technology*, John Wiley & Sons, 2 ed., 2002, kaflar 12.1 - 12.2
- [2] Harry J. Levinsson and William H. Arnold, Optical Lithography, in *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication, Volume 1: Microlithography*, ed. P. Rai-Choudhury, p. 11 – 138, SPIE Optical Engineering Press, 1997
- [3] K. Nakamura, Lithography, in *ULSI Technology*, editors C. Y. Chang and S. M. Sze, p. 270 – 328, McGraw-Hill, 1996