

Framleiðsla smárása:

Málmar

Kaflí 18

Jón Tómas Guðmundsson

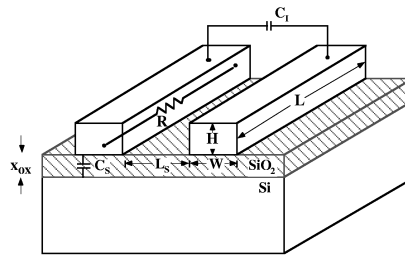
tumi@hi.is

12. vika haust 2016

Tengingar

- Í smárás þarf tengi (e. interconnects) til að fæða afl og gefa jörð til einstakra smára sem og að bera merki um rásina
- Millitengi skiptast í tvo meginhópa
 - Staðbundin tengi (e. local interconnects) eru eingöngu á einstökum smárum og tengjast við víðfeðm millitengi (fjölkrystallaður kísill, silicides, TiN)
 - Víðfeðm millitengi (e. global interconnects) fæða afl og gefa jörð til einstakra smára og bera merki um rásina (venjulega ál)
- Breidd tengilínanna ræðst af því hve mikinn straum þeim er ætlað að bera

Tengingar



- Töf í millitengjunum má meta með einföldu líkani
- Töfin (ristími) vegna global millitengja er

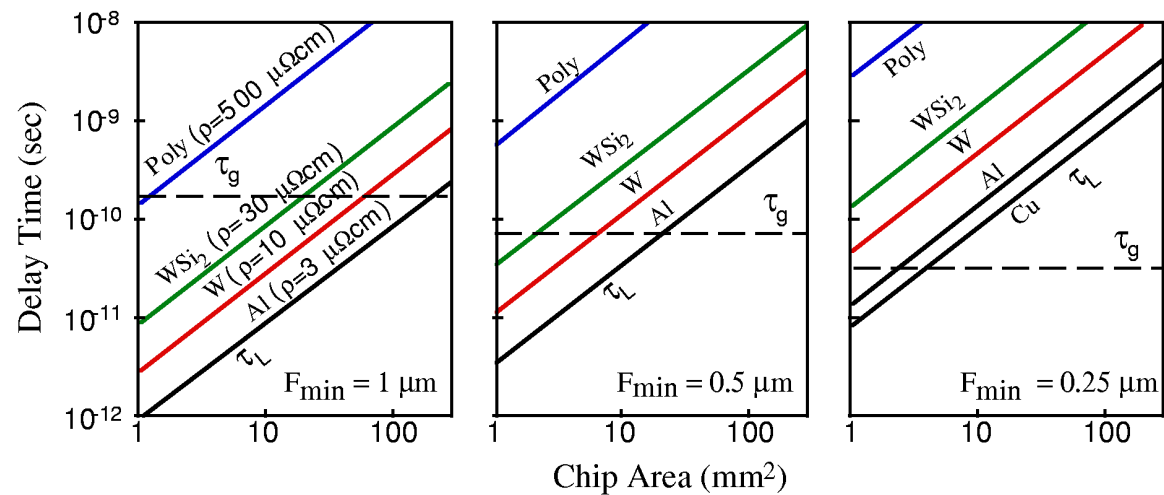
$$\tau_L = 0.89RC = 0.89\epsilon_I\epsilon_{\text{diel}}\epsilon_0\rho L^2 \left(\frac{1}{Hx_{\text{ox}}} + \frac{1}{WL_S} \right)$$

þar sem

- ϵ_{diel} er hlutfallslegur rafsvörunarstuðull rafsvara
- ϵ_I er þáttur vegna fringing fields
- ρ er eðlisviðnám málmtengilínunnar

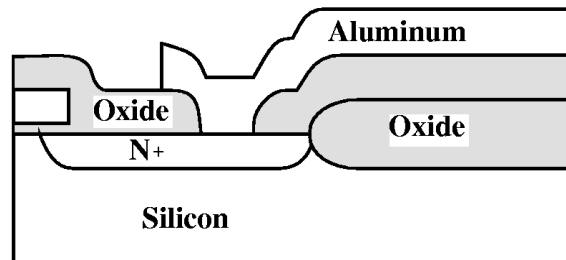
Tengingar

- Tímatöf í millitengjum (RC töf) ræðst þannig af rafsvörunarstuðli rafsvara og eðlisleiðni leiðara
- Þessi gildi er reynt að lækka með nýrri efnistækni



- Tímatöf í millitengjum og gátt sem fall af stærð flögu

Ál og álmelmi

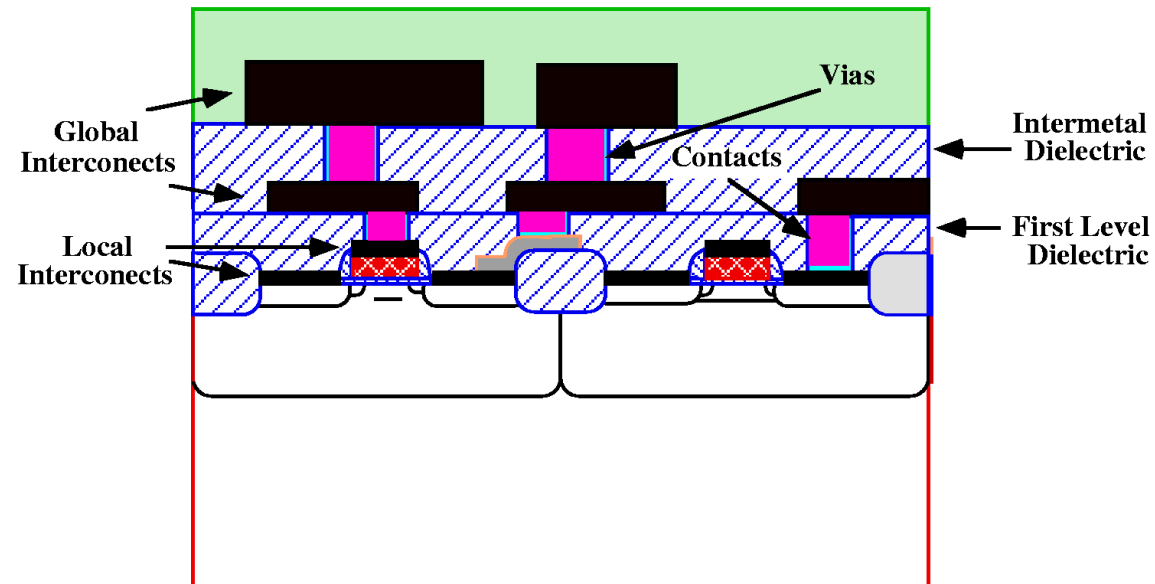


- Fyrstu rásirnar höfðu einfaldar Al-Si snertur
- Kísillinn þarf að vera mikið íbættur til að fá lág viðnáms ohmsk skeyti

$$\rho_c = \rho_{c0} \exp\left(\frac{2\phi_b \sqrt{m^* \epsilon_{Si}}}{h \sqrt{N_D}}\right)$$

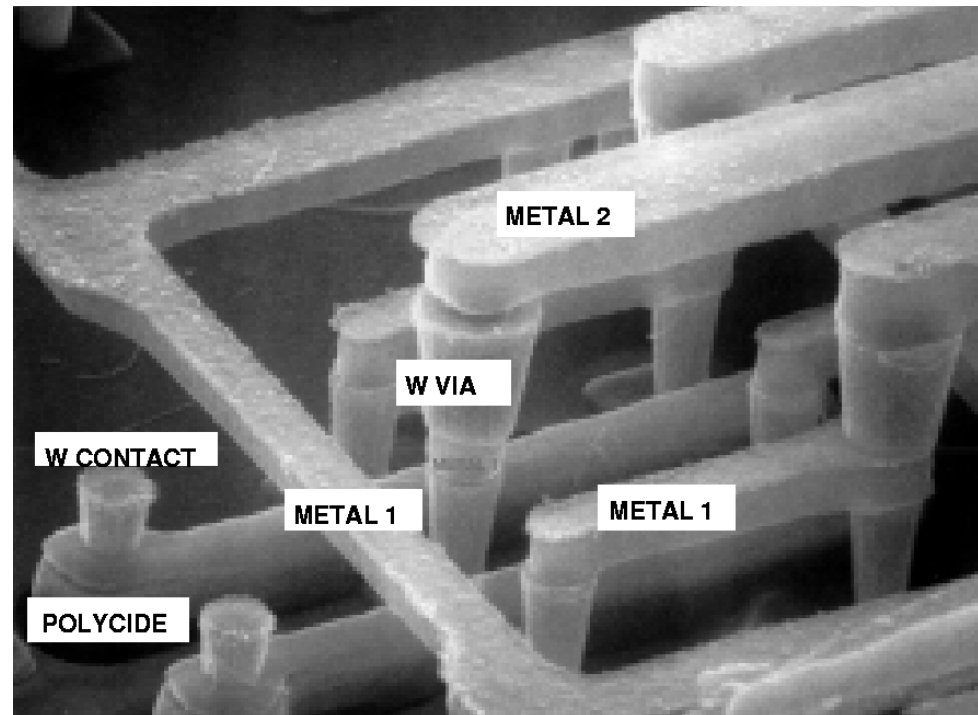
- Smug um Schottky skeytin ræðst af vidd þröskuldsins og þess vegna af N_D
- Í raunveruleikanum þarf $N_D, N_A > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

Ál og álmelmi



- Með fleiri lögum af millitengjum eykst virkni (e. functionality) og hraði rásarinnar

Ál og álmelmi



- Sífelld stærri hluti rásarinnar og framleiðsluferlisins liggur í millitengjunum
- Í nútíma rásum eru millitengin ráðandi í heildarhraða rásarinnar

Ál og álmelmi

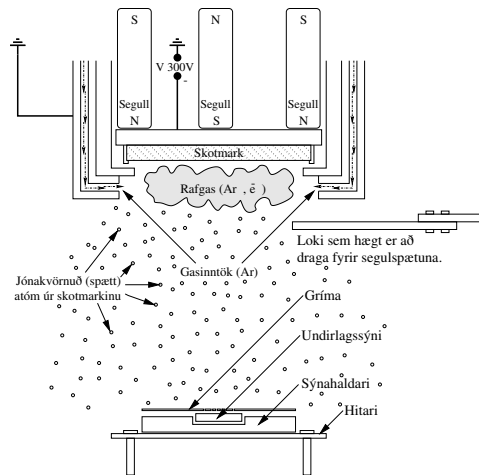
Year of 1st DRAM Shipment	1997	1999	2003	2006	2009	2012
Minimum Feature Size, F_{min} (nm)	250	180	130	100	70	50
DRAM Bits/Chip	256M	1G	4G	16G	64G	256G
DRAM Chip Size (mm ²)	280	400	560	790	1120	1580
MPU Chip Size (mm ²)	300	360	430	520	620	750
Wiring Levels - Logic	6	6-7	7	7-8	8-9	9
Min metal CD (nm)	250	180	130	100	70	50
Min contact/via CD nm	280/ 360	200/ 260	140/ 180	110/ 140	80/100	60/70
Metal Aspect Ratio	1.8	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
Contact aspect ratio (DRAM)	5.5	6.3	7.5	9	10.5	12
Via aspect ratio (logic)	2.2	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2
Metal resistivity (μ -cm)	3.3	2.2	2.2	2.2	<1.8	<1.8
Interlevel metal dielectric constant	3.0-4.1	2.5-3.0	1.5-2.0	1.5-2.0	<1.5	<1.5

- Kröfur um eiginleika millitengja í framtíðarframleiðslu

Málmhúðir

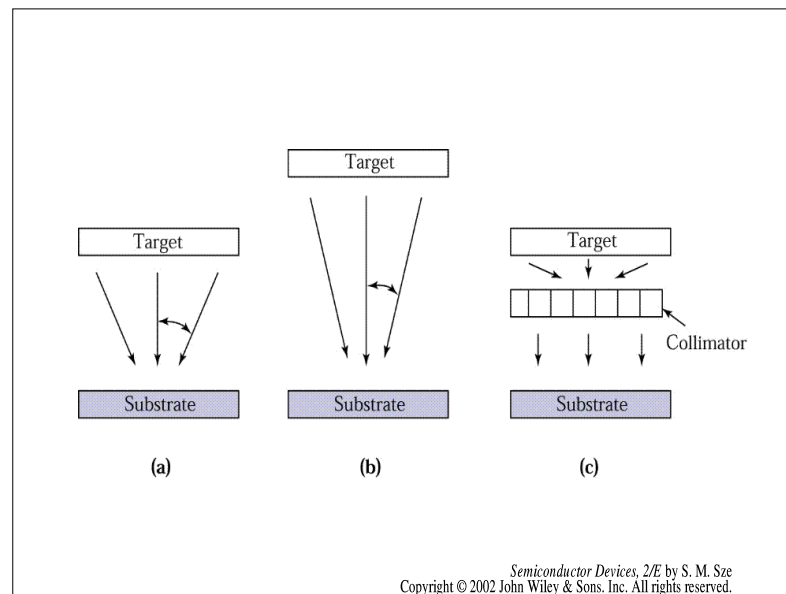
- Algengustu aðferðir við ræktun málna er (e. Physical vapor deposition (PVD)) eru evaporation, e-beam evaporation, rafgas ræktun og spætun
- Málna og málnasambönd eins og Ti, Al, Cu, TiN og TaN má rækta með PVD
- Evaporation er það þegar málmur er hitaður upp fyrir bræðslumark sitt í lofttæmdum klefa
- Málminn má bræða með viðnámshitun, rf hitun eða rafeindageisla
- Evaporation var mikið notuð við framleiðslu fyrstu smárásanna en hefur mikið fyrir spætun í ULSI rásum
- Við spætun er jónum hraðað að skotmarki úr málni

Málmhúðir



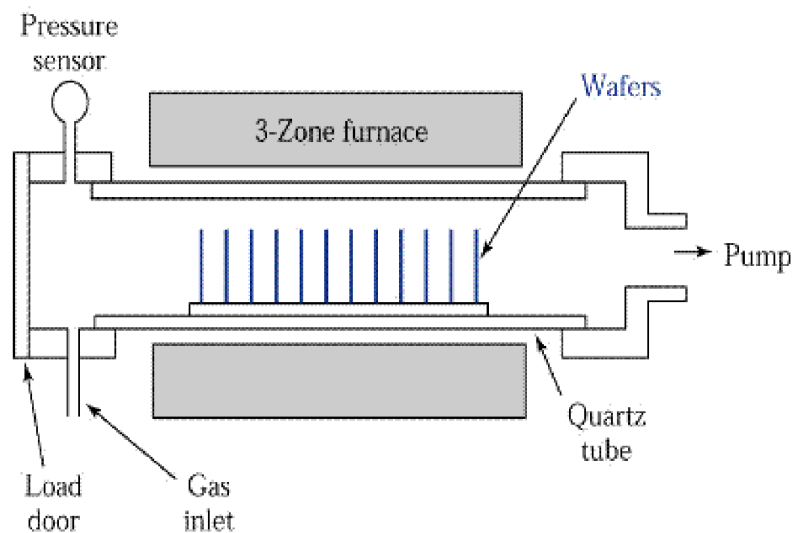
- Jónin spætir úr skotmarkinu málmatóm sem lendir á skífunni sem er situr andstætt því
- Jónaþéttleika við skotmarkið má auka í segulspætu, sem gefur aukinn ræktunarhraða
- Í segulspætu má rækta við lægri gasþrýsting en ella, jafnvel niður undir 0.1 Pa

Málmhúðir



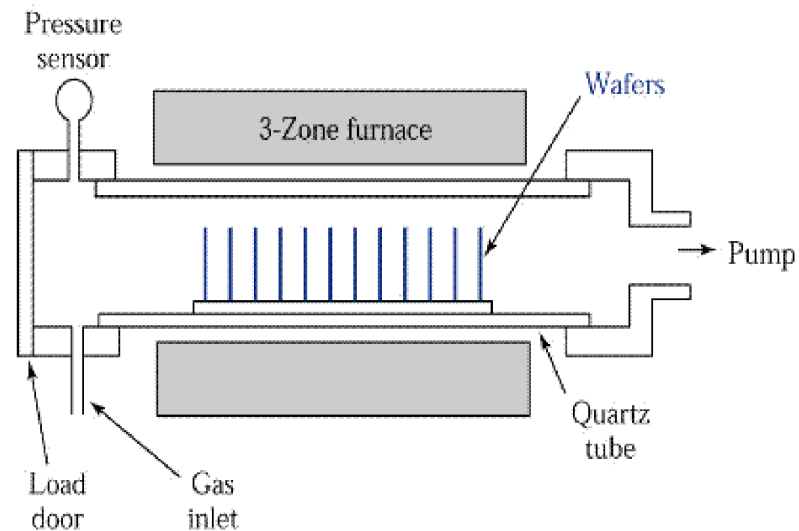
- Erfitt er að fylla djúpar þröngar holur, einkum vegna dreifingar (e. scattering) sem veldur því að holan lokast efst áður en hún verður full
- Þetta hefur verið leyst með því að beinstilla (e. collimating) spættu atómin

Málmhúðir



- Efnagufuágræðsla (e. chemical vapor deposition (CVD)) er notadrjúg til ræktunar málma
- Húðir ræktaðar með CVD eru conformal, hafa góða skref þekju (e. step coverage) og húða má á nokkurn fjölda skífa samtímis

Málmhúðir



- Í raun er sama uppsetning notuð og þegar ræktaðir eru rafsvavarar og fjölkristallaður kísill
- Með lágþrýstings CVD (LPCVD) má fá conformal skref þekju yfir flókið undirlag og viðnám húðanna er gjarnan lægra en þegar ræktað er með PVD

Málmhúðir

CVD-W

- Þungsteinn (e. wolfram) er notaður bæði sem tengitappi (e. contact plug) og sem fyrsta málm lag
- Þungsteinn er ræktaður með WF_6 sem lindargas

CVD TiN

- TiN er vinsæll sveimþröskuldur fyrir málma
- TiN má einnig spæta úr skotmarki eða rækta með CVD
- CVD TiN gefur betri skrefþekju (e. step coverage), þá er notað $TiCl_4$ með NH_3 , NH_3/H_2 eða H_2/N_2
- Ræktunarhitastigið er þá 400 - 700°C ef NH_3 er notað en $> 700^\circ C$ ef H_2/N_2 er notað

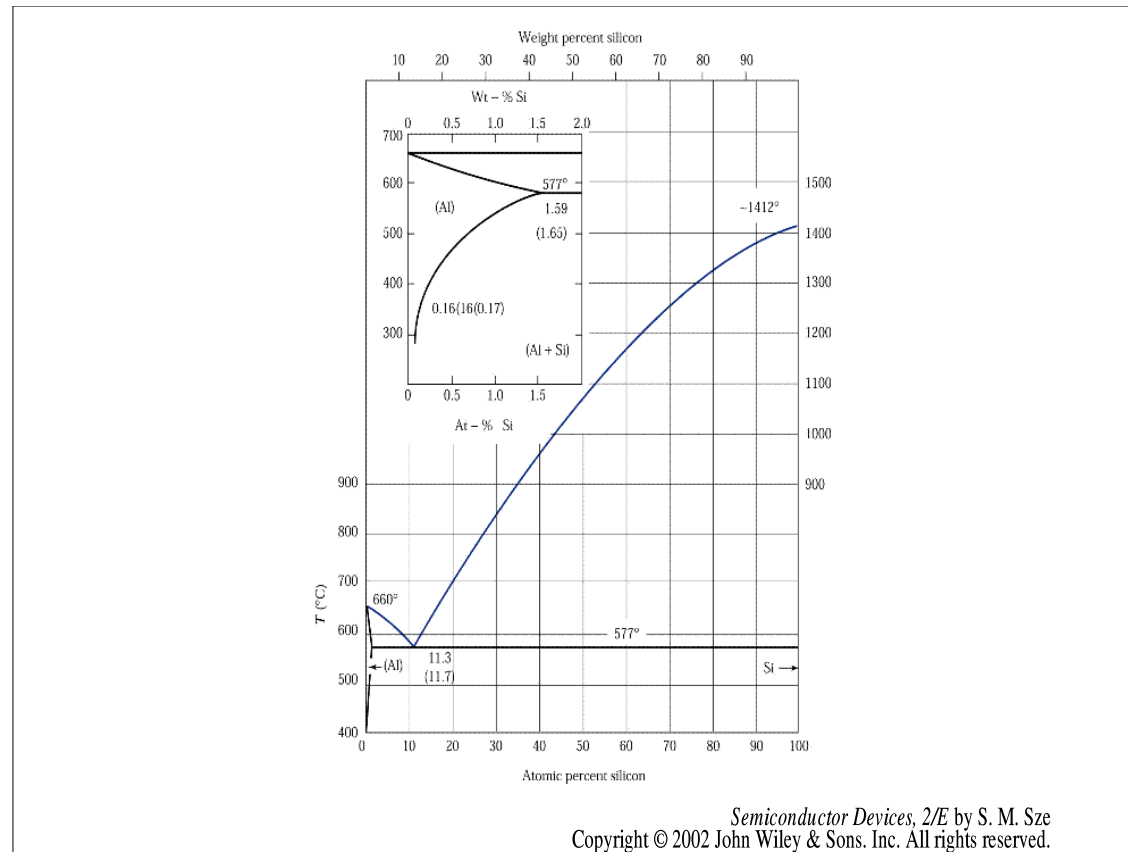
Ál og álmelmi

- Ál og álmelmi hafa verið mikið notuð í málmhúðir og tengi í smárásum í gegnum tíðina
- Álhúð má rækta með PVD eða CVD aðferðum
- Þar eð ál og álmelmi hafa lágt eðlisviðnám, $2.7 \mu\Omega$ cm fyrir ál og upp í $3.5 \mu\Omega$ cm fyrir álmelmi uppfylla þessir málmar kröfuna um lágt viðnám
- Ál loðir (e. adheres) vel við kísil og kísiloxíð

Ál og álmelmi

- Notkun á áli hefur þó í för með sér vandamál m.a.
 - myndun álbrotta (e. spiking)
 - rafrek (e. electromigration)
 - lágt bræðslumark og mýkt
 - myndun hóla (e. hillocks) og innfláka (e. voids)

Ál og álmelmi

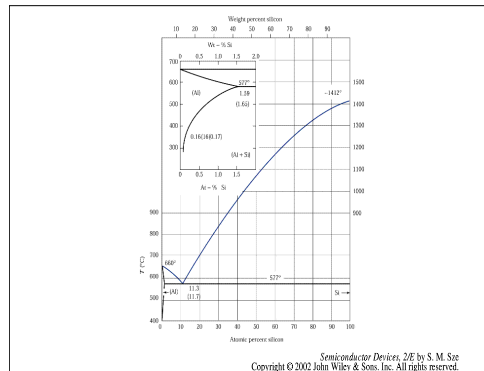


- Myndin sýnir fasalínurit af Al-Si kerfinu við 1 atm

Ál og álmelmi

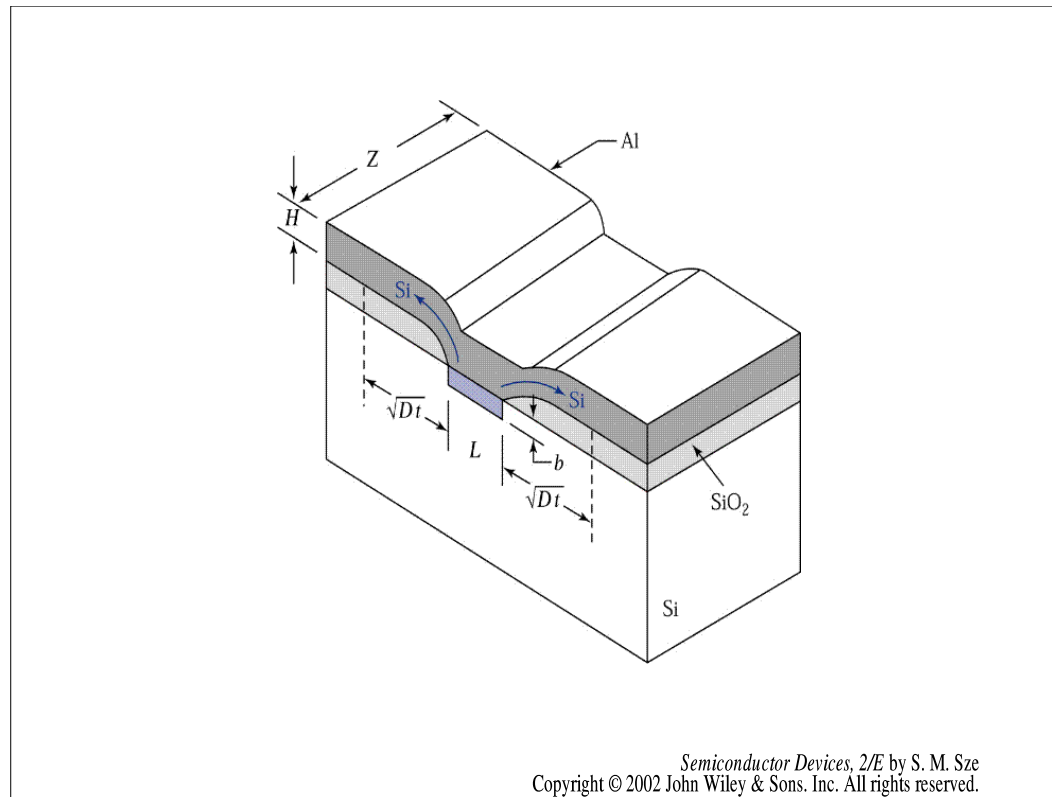
- Al-Si kerfið sýnir jafnstorku hegðan (e. eutectic), það er að ef öðru hvoru frumefninu er bætt í blönduna lækkar það bræðslumark kerfisins niður fyrir það sem hreint efni hefur
- Lægsta bræðslumark, jafnstorku bræðslumark, er 577°C sem svarar til 11.3 % Si og 88.7 % Al
- Bræðslumark hreins kísils er 1412°C og áls 660°C
- Vegna þessara eiginleika verður að gæta þess að kísilinn hitni ekki upp fyrir 577°C þegar áli er lagt niður á hann

Ál og álmelmi



- Myndin sýnir einnig leysnimörk kísils í áli
- Við 400°C er leysni kísils í áli 0.25 wt%, 0.5 wt% við 450°C, 0.8 wt% við 500°C
- Vegna þessa leysist kísill upp í álinu hvar sem ál snertir kísil við bökun
- Magn kísils sem leysist upp er háð leysni kísils við tiltekið bökunarhitastig og magni áls sem er mettað með kísli

Ál og álmelmi



- Gerum ráð fyrir ál línu í snertingu við kísilflöt af stærð ZL

Ál og álmelmi

- Eftir bökun í tíma t sveimar kísillinn vegalengdina \sqrt{Dt} frá snertifleti áls við kísil, þar sem D er sveimfasti

$$D = 4.2 \times 10^{-2} \exp(-0.92/kT)$$

fyrir sveim kísils í álhúð

- Gerum ráð fyrir að álið sé fullkomlega mettað af kísli
- Rúmmál kísils sem leysist upp er

$$\text{Vol} \approx 2\sqrt{Dt}(HZ)S \left(\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}} \right)$$

þar sem ρ_{Al} er eðlismassi áls, ρ_{Si} er eðlismassi kísils og S eru leysnimörk kísils í áli við bökunarhitastigið

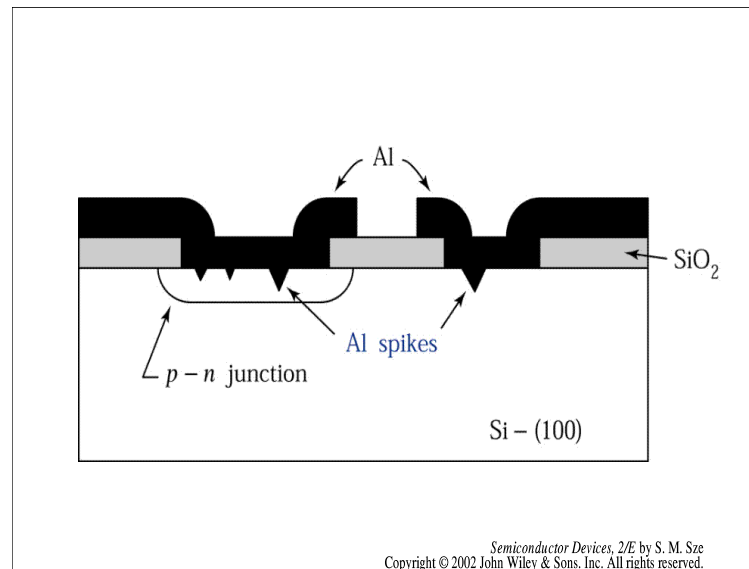
Ál og álmelmi

- Ef upptaka kísils er jafndreifð yfir snertiflötinn A (þar sem $A = ZL$) þá er dýpt kísileyðingar

$$b \approx 2\sqrt{Dt} \frac{HZ}{A} S \left(\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}} \right)$$

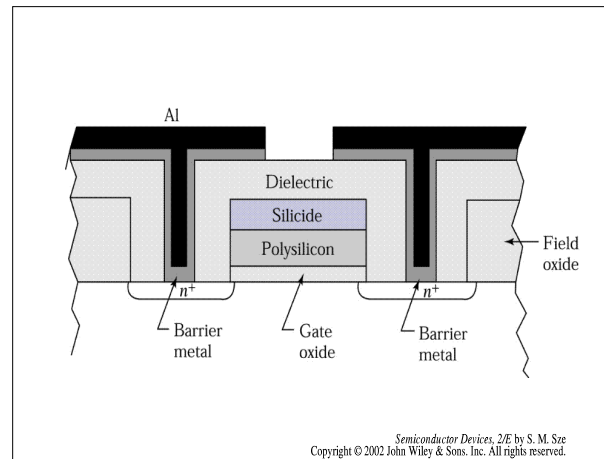
- Í raun er þó leysni kísils ekki einsleit og fremur aðeins staðbundin í punktum
- Virkt flatarmál er mun minna en snertiflöturinn og b þess vegna mun stærra

Ál og álmelmi



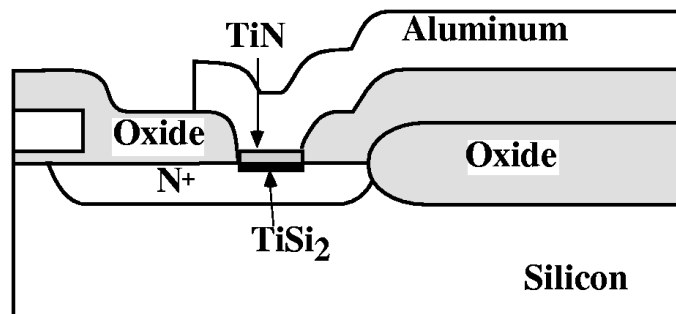
- Kísillinn sveimar þá inn í álið, holur myndast og álið fyllir í holurnar
- Myndin sýnir raunveruleikann í $p - n$ -samskeytum þar sem ál smýgur inn í kísilinn í nokkrum punktum og álbrottdar myndast (e. spikes)

Ál og álmelmi



- Lausnir á þessu vandamáli
 - Bæta kísli í álið (1 - 2 %) með coevaporation þar til melmið er við leysnimörk kísils í áli
 - * Galli við þessa aðferð er að kísillinn getur fallið út þegar álið kólnar sem leiðir til hækkunar á eðlisviðnámi
 - Mynda þröskuldslag milli áls og kísils

Ál og álmelmi



- Þröskuldurinn verður að hafa lágt snertiviðnám við yfirborð kísilsins og má ekki hvarfast við álið
- Ræktunin verður að vera samhæfanleg við framleiðsluferlið
- Þröskuldsbólmar eins og TiN eru stöðugir upp í 550°C í allt að 30 mín
- Einnig er oft notað Ti eða TiS₂ fyrir snertu og TiN sem þröskuldur

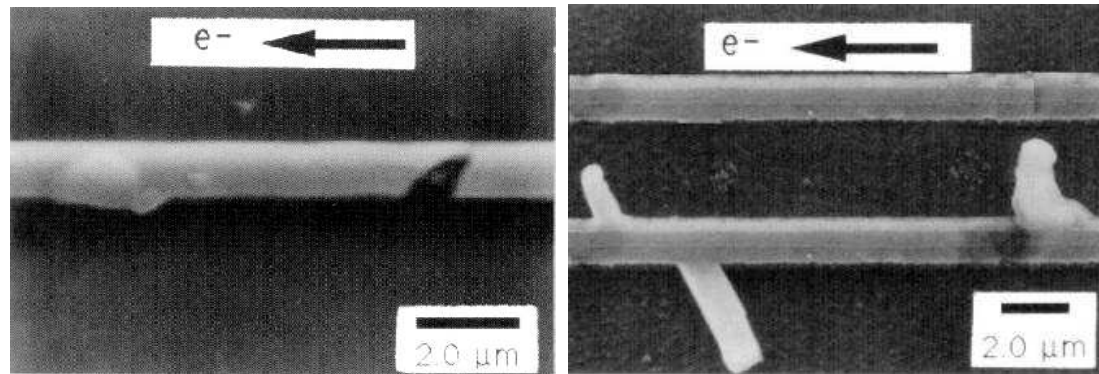
Ál - Rafrek

- Meðal tíminn sem líður þar til niðurbrot (e. mean time to failure (MTF)) leiðara á sér stað vegna rafreks (e. electromigration) er háð straumpéttleika J og örvunarorkunni E_a

$$\text{MTF} \sim \frac{1}{J^2} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

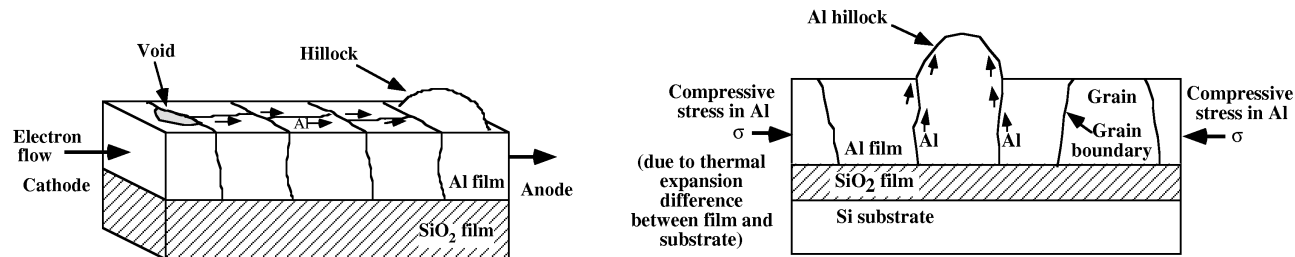
- Hár straumpéttleiki (0.1 - 0.5 MA/cm²) veldur færslu Al atóma í stefnu rafstraumsins
- Þetta getur valdið myndun innfláka og hóla í málminum
- Mælingar gefa $E_a \approx 0.5$ eV fyrir ál
- Þetta gefur til kynna sveim á kornamörkum sem megin flutningsferli, því að $E_a \approx 1.4$ eV fyrir einkristallað ál

Ál - Rafrek



- Skaðinn getur komið fram sem opin rás eða í hólum sem valda skammhlaupi
- Mótstöðu áls til rafreks má auka á ýmsan veg
 - Mynda melmi með kopar (þ.e. Al með 0.5 - 4 % Cu)
 - Fela leiðarann í rafsvara
 - Innleiða súrefni við ræktun

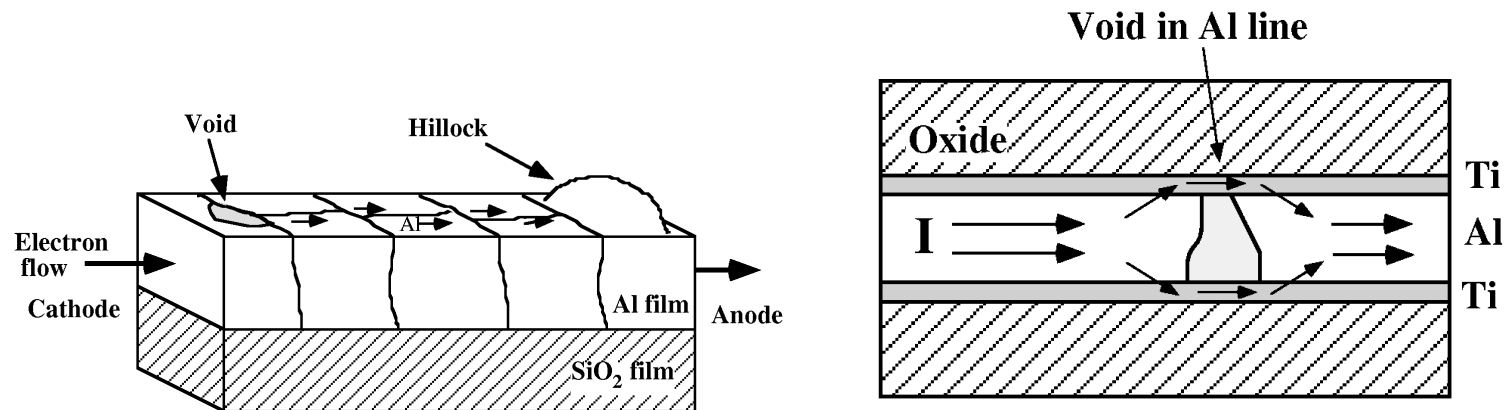
Ál og álmelmi



- Hólar og innflákar myndast vegna álags og sveims í álhúðum
- Bökun þjappar álinu og myndar hóla
- Ál húðir eru gjarnan ræktaðar við 200°C en ál tappar (e. plug) þurfa hærra hitastig, oft 450°C
- Þegar kælt er verður þensla sem veldur innflákum
- Vegna þess að varmaþennslustuðull áls er hár verður þensla í húðinni við kælingu

Ál og álmelmi

- Ef bætt er kopar í álið (nokkur wt%) verða kornamörkin stöðugir og það dregur úr hólamyndun



- Vegna þessa er ál oftast lagt niður með 1 - 2 wt% Si og 0.5 - 4 wt% Cu

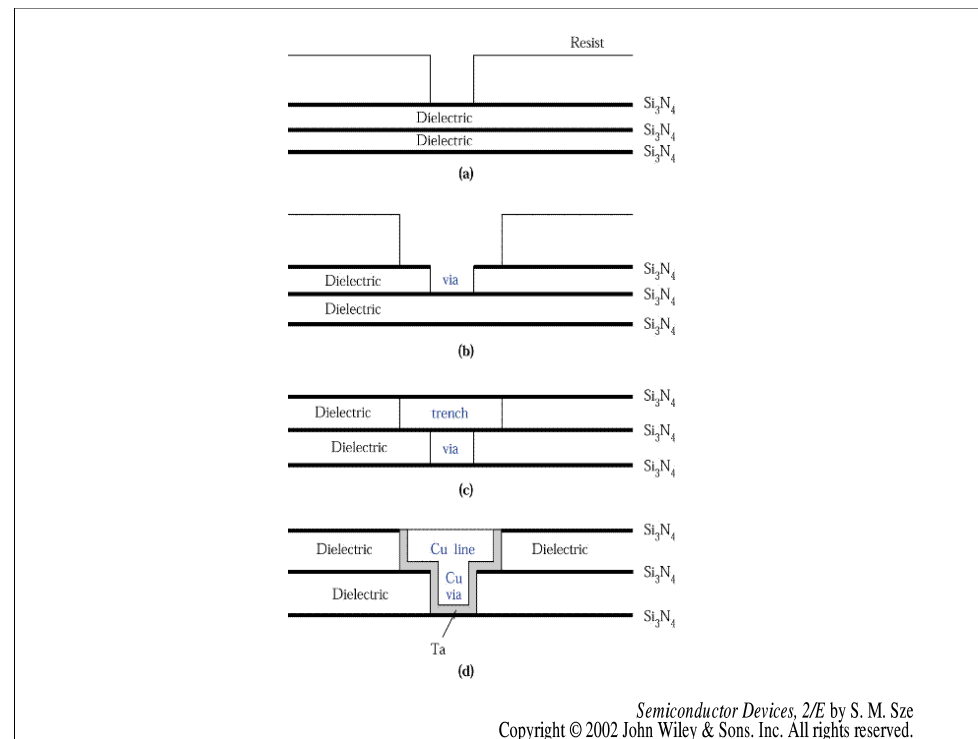
Kopar

- Þörf er á hárrni leiðni leiðara og lágum rafsvörunarstuðuli rafsvara til að minnka RC tímatöf í millitengjum
- Kopar er augljóst val þar sem hann hefur hærri leiðni og herra viðnám á móti electromigration en ál
- Kopar má rækta með PVD, CVD og rafefnaaðferðum (e. electrochemical)
- Gallar við kopar
 - hefur tilhneigingu til að tærast við framleiðsluna
 - þurr æting gengur ekki
 - ekki er til stöðugt oxíð sambærilegt við Al_2O_3 fyrir Al
 - loðir illa við rafsvara

Kopar

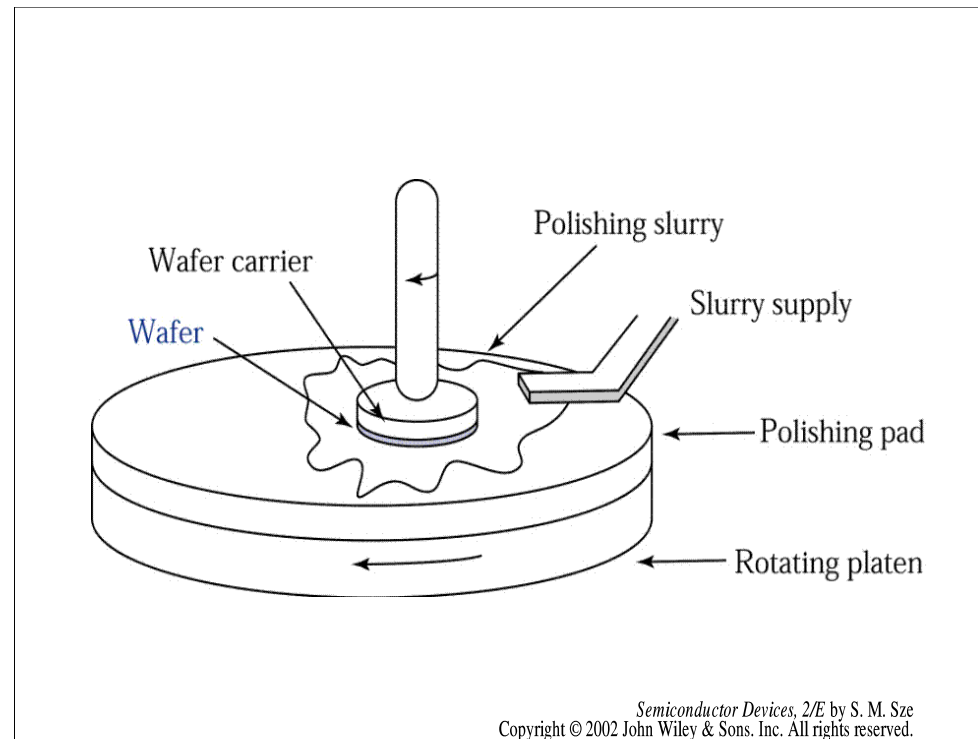
- Það eru nokkrar framleiðsluaðferðir fyrir millitengi úr kopar
 - Hin hefðbundna leið að leggja koparinn niður í mynstur og leggja rafsvarann yfir
 - Önnur leið er að gera mynstrið í rafsvarann og leggja koparinn í raufirnar
- Þegar síðari leiðin er farin þarf að fylgja efnaslípun (e. chemical mechanical polishing (CMP)) til að fjarlægja auka málm af yfirborðinu þ.a. kopar sé eingöngu í holum og raufum
- Þessi aðferð er nefnd fylling (e. damascene)

Tvöföld fylling



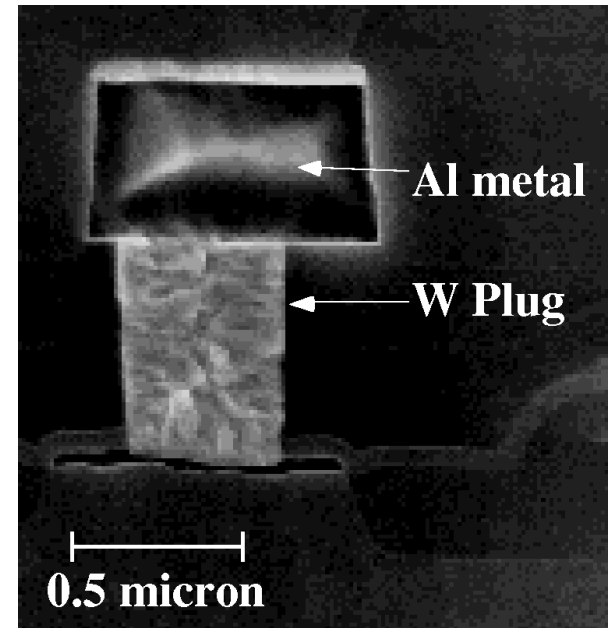
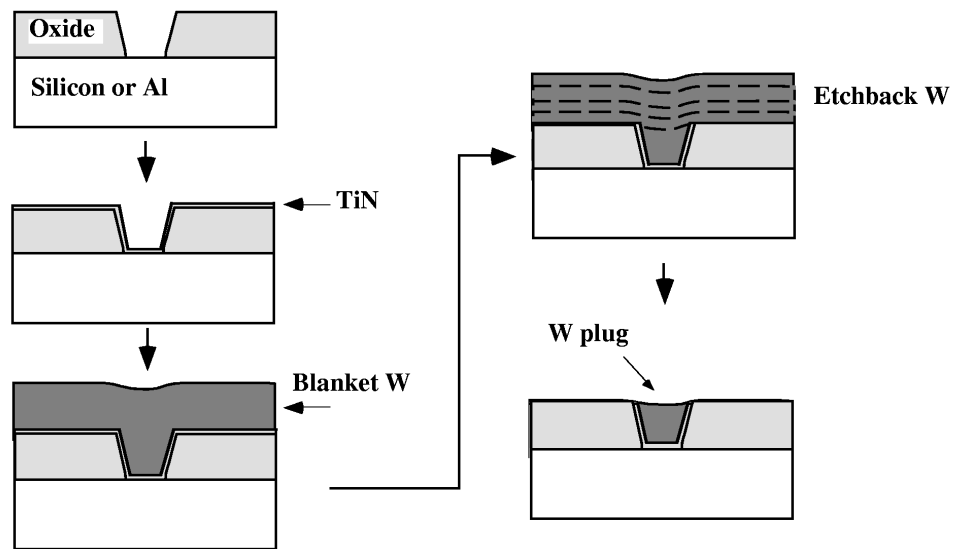
- Í tvöfaldri fyllingu (e. dual damascene) eru gegnum tengi (e. via) og raufir myndaðar í rafsvara með tveimur lithography og RIE ætingarskrefum áður en koparinn er lagður niður

Efnaslípun (CMP)



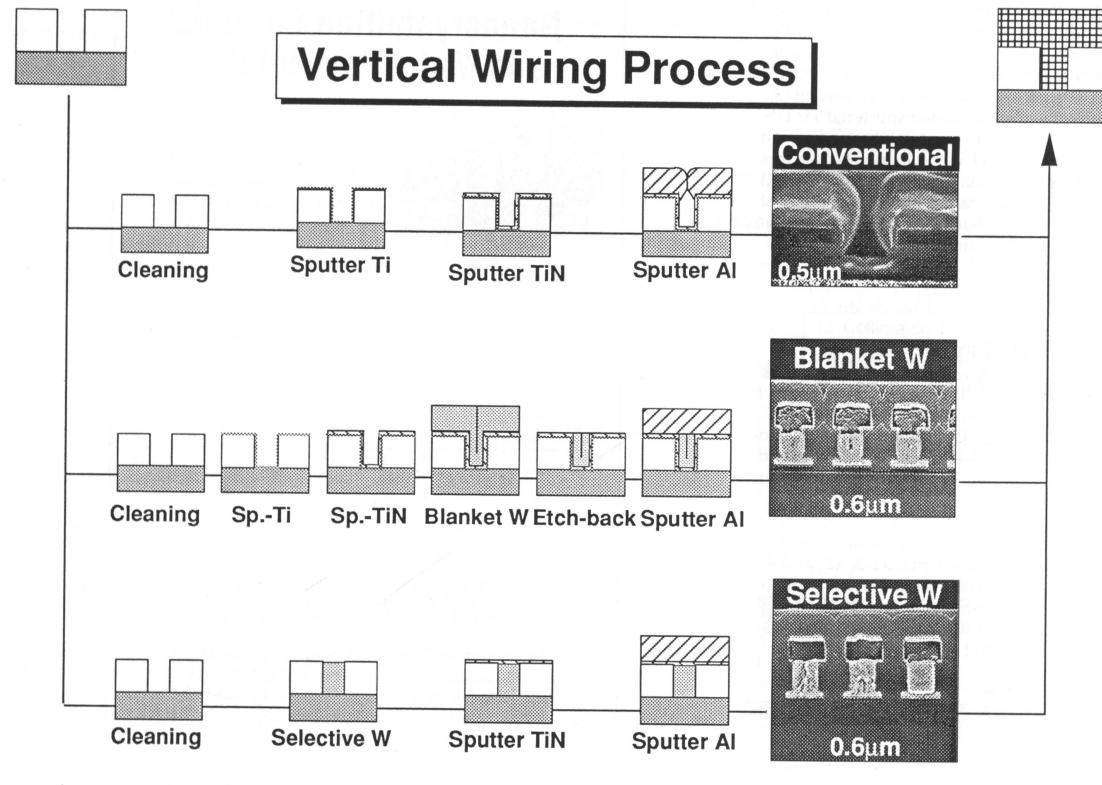
- Með efnaslípun má gera flatt yfirborð yfir alla skífuna
- Þá er skífan lögð á púða sem á er slurry og hún slípuð

Fylling



- Fylling með þungsteini

Fylling



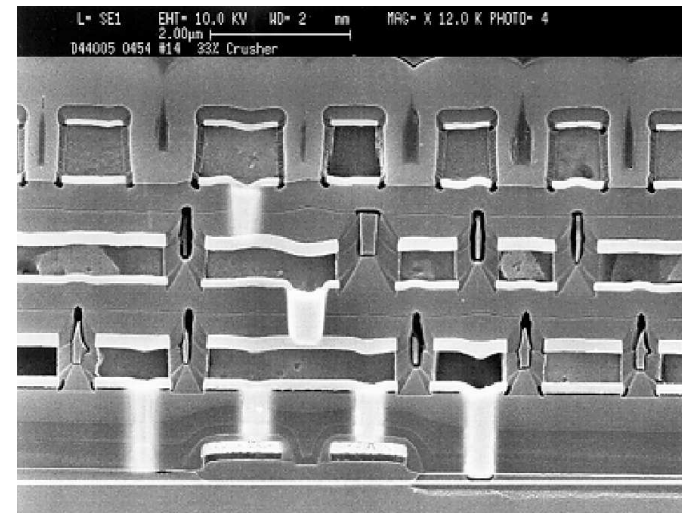
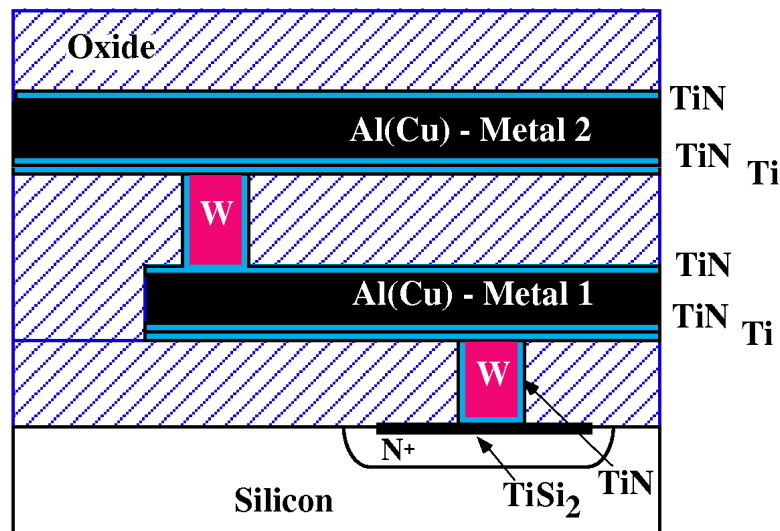
Fra Ohba 1995 (5)

- Fylling með þungsteini

Silicides

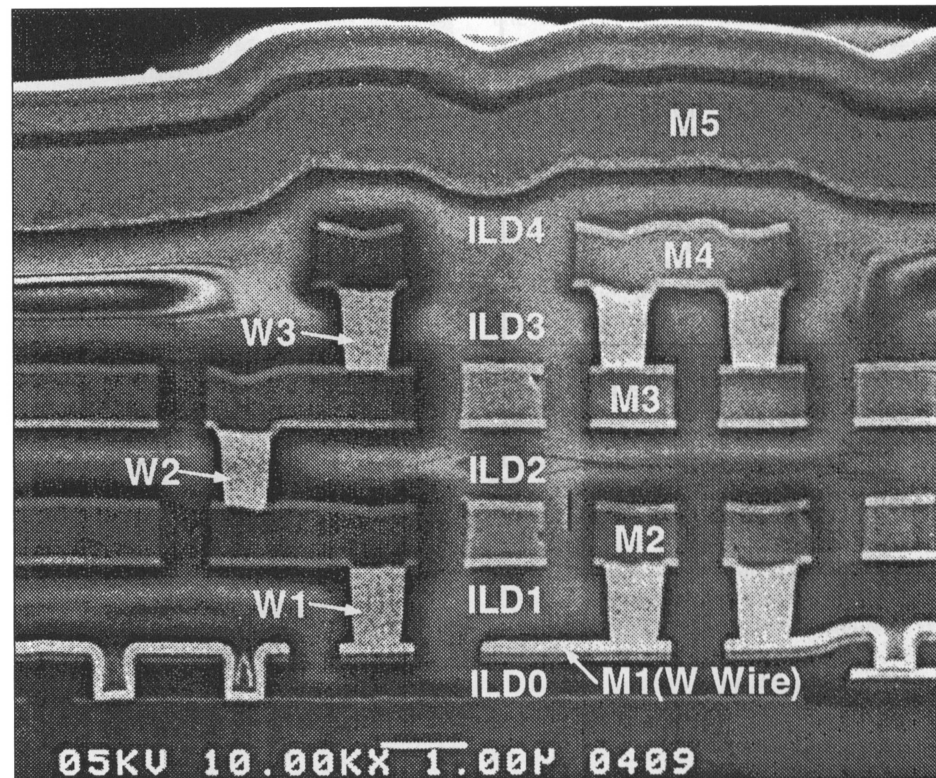
- Oft eru notuð önnur sambönd í staðbundin millitengi (e. local interconnects) eins og TiN og silicides
- Kísill myndar nokkur stöðug málm og hálfleiðandi efnasambönd
- Nokkur málm silicides hafa lágt viðnám og sýna góðan stöðugleika við hitastigsbreytingar
- Silicides eins og TiSi_2 og CoSi_2 hafa tiltölulega lágt viðnám og eru samhæfanleg við framleiðsluferli smárása
- Silicides eru mikilvægari því smærri tólin eru sem byggja skal

Nútíma rásir



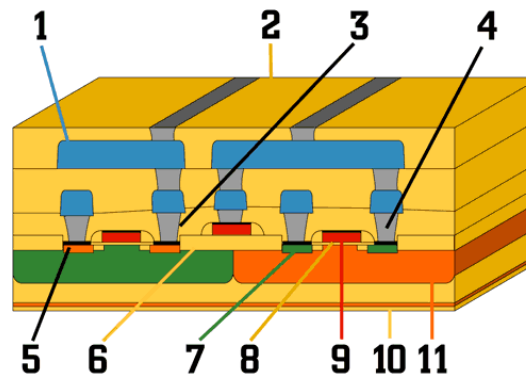
- Nútíma rásir nýta alla þessa tækni
- Millitengi eru nú fjöllaga

Nútíma rásir



Fra Ohba 1995 (5)

Lagvöxtur



1. Málmtengi
2. Rafsvaralög
3. Sveimþröskuldar
4. Snertur og gegnumtengi (e. via)
5. Silicides
6. Sviðsoxíð
7. Lindir og svelgir
8. Gáttaroxíð
9. Gátt
10. Grafín lög
11. Retrorade wells

Heimildir

- [1] James D. Plummer, Michael D. Deal, and Peter B. Griffin, *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling*, Prentice Hall, 2000, kaflar 11.1 - 11.3
- [2] S. M. Sze, *Semiconductor devices: Physics and technology*, John Wiley & Sons, 2 ed., 2002, kaffi 11.4
- [3] D. Pramanik, Aluminum-Based Metallurgy for Global Interconnects, *MRS Bulletin* **20** (November 1995) 57 – 60
- [4] T. J. Licata, E. G. Colgan, J. M. E. Harper and S. E. Luce, Interconnect fabrication processes and the development of low-cost wiring for CMOS products, *IBM Journal of Research and Development* **39** (1995) 419-438
- [5] T. Ohba, Chemical-Vapor-Deposited Tungsten for Vertical Wiring, *MRS Bulletin* **20** (November 1995) 46 – 52