

1. Uvod

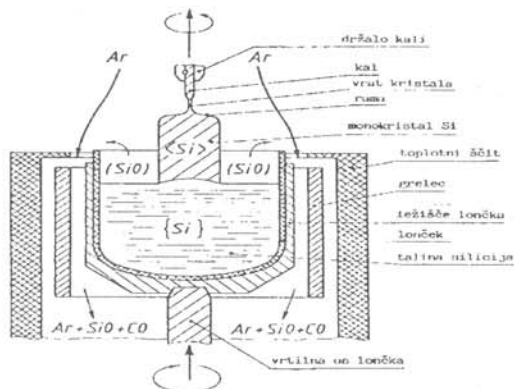
Silicijev monokristal je osnova za izdelavo večine diskretnih polprevodniških elementov in integriranih vezij. Danes se uporabljajo tudi nekateri drugi polprevodniški materiali, kot so npr. GaAs, Ge, InP, GGG, vendar bo silicij zaradi prikladnosti tehnološke izdelave, razširjenosti in s tem cene ostal polprevodnik številka ena. Pred desetimi leti je bila svetovna proizvodnja silicija okrog 1000 ton, leta 1983 pa že 3000 ton. Samo v ilustracijo: iz 3000 ton Si monokristala bi lahko naredili integrirana vezja za 80 milijard (80×10^9 !) žepnih računalnikov.

Osnovni tehnologiji za izdelavo Si-monokristala sta: metoda Czochralski (CZ) in metoda float zone (FZ). Po prvi je izdelanih približno 80%, po drugi pa skoraj 20% vseh tovrstnih kristalov na svetu. Poznane so še druge metode kot npr. rast monokristala iz podstavka (pedestal pulling), rast monokristala v obliki traku itd. vendar le-teh po količini proizvedenega monokristalnega silicija ne moremo primerjati s tehnologijama CZ in FZ.

2. Osnove CZ metode

Po CZ metodi kose zelo čistega polisilicija stalimo v lončku iz kremenovega stekla. Ker je kremenovo steklo pri temperaturi tališča silicija (1420°C) razmeroma plastično, mora biti le-ta podprt z neplastičnim materialom - grafitom. Segrevamo z uporovnim grafitnim grelcem. Od strani zgoraj in spodaj je grelec izoliran z grafitnimi deli. Vsem tem elementom skupaj pravimo topla cona. Celoten postopek poteka v nevtralnem atmosferi Ar pri pritisku, ki je nekoliko višji od atmosferskega ali pa v vakuumu 15-20 mbar.

Ko se polisilicij stali, je potrebno temperaturo taline in temperaturo delov tople zone stabilizirati. V talino pomočimo kristalografsko pravilno orientirano monokristalno kal in jo počasi vlečemo iz taline. Lonček s talino in kal se vrtila v nasprotnih smereh. Tipična hitrost vleke, kristala je 76.2 mm/h (3 "/h). Metoda vlečenja monokristala je shematsko prikazana na sl. 1.



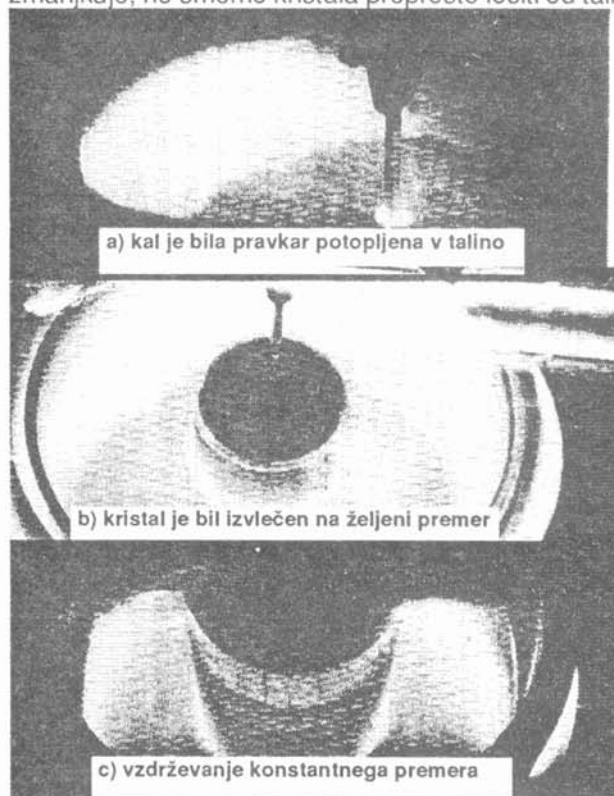
Slika 1: Shematični prikaz vlečenja kristala po metodi Czochralski

Najzahtevnejši del postopka je vlečenje vratu kristala. Danes se najpogosteje uporablja kristal brez dislokacij (dislocation-free). Če želimo, da bo monokristal, ki ga vlečemo, brez dislokacij, mora potekati vlečenje vratu kristala najprej hitro (250 do 350 mm/h, ustrezen premer vratu je cca 3 mm; Po izvlečenih 5 cm vratu kristala pa moramo hitrost vlečenja zmanjšati na 25 mm/h; premer kristala se pri tem poveča.

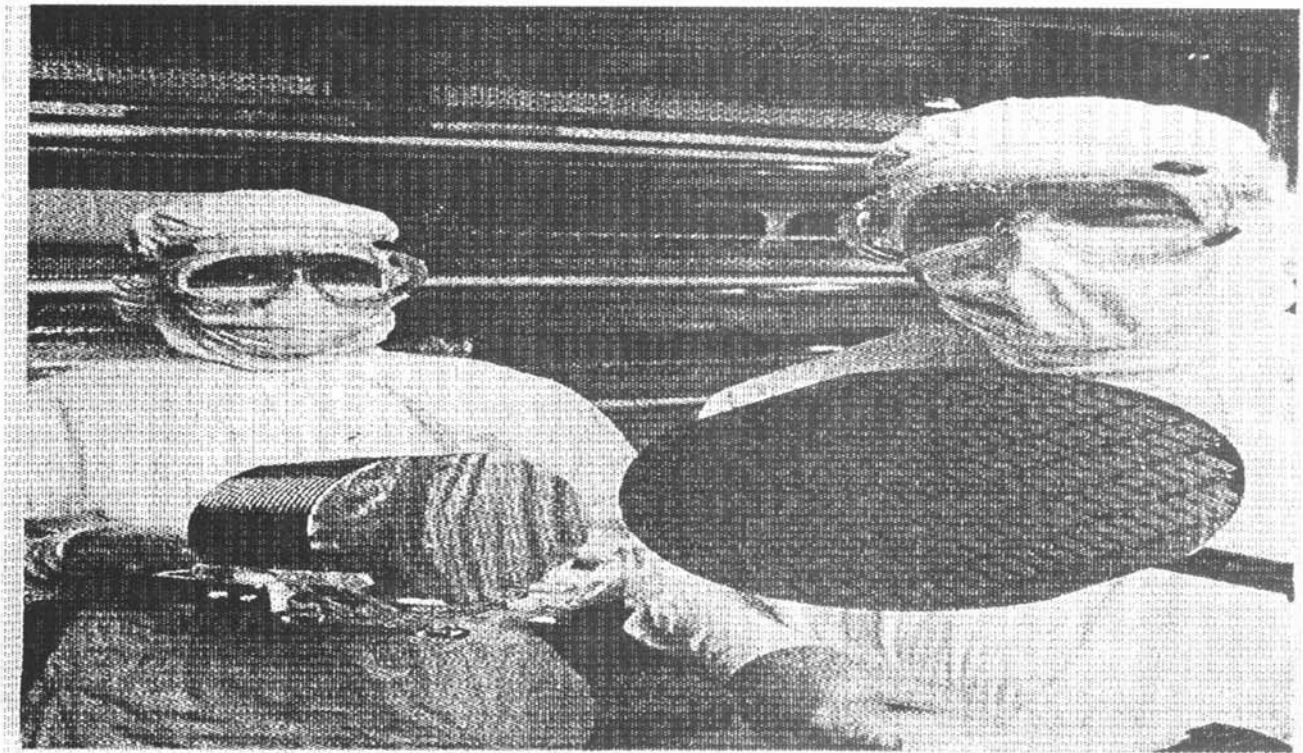
In kakšna je zveza med parametri vlečenja in vsebnostjo dislokacij? Glavni izvor dislokacij so notranje napetosti, ki nastanejo zaradi temperaturnega gradienta med sredino in robom pravkar kristaliziranega monokristala. Če torej premer monokristala zmanjšamo, zmanjšamo gradient temperature in na ta način notranje napetosti ter generacijo dislokacij. Zagotoviti moramo še hitro rast monokristala (hitri vlek), tako da je gibanje dislokacij počasnejše kot pa je rast kristala. Opisani postopek na začetku vlečenja kristala je potreben pogoj za rast kristala brez dislokacij, ni pa zadosten. Vsaka nadaljnja hitra sprememba temperaturne taline, hitrosti vlečenja, vibracija ali tujek povzroči nastanek dislokacij in izgubo strukture.

Vrnimo se k vlečenju kristala. Ko premer kristala doseže željeno vrednost, povečamo hitrost vlečenja. Enakomeren premer kristala zagotovimo s hitrostjo vlečenja in temperaturo. Kontrola premera v novejših napravah je avtomatska; premer kristala je tako po vsej dolžini znotraj tolerance.

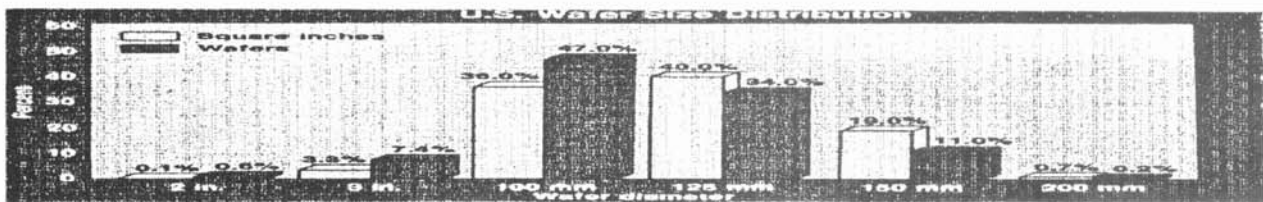
Na koncu vlečenja, ko taline v kremenovem lončku zmanjkuje, ne smemo kristala preprosto ločiti od taline.



Slika 2: Stopnje pri vlečenju kristala



Slika 3: Si.3. Rezine premera 200 mm med procesom



Slika 4: Porazdelitev velikosti Si rezin uporabljenih v ZDA v letu 1987

Zaradi temperaturnega šoka, ki bi pri tem nastal, bi prišlo do pojava dislokacij in do plastičnih deformacij. Zato je potrebno hitrost postopoma povečati tako, da se premer kristala enakomerno zmanjšuje. Posamezne stopnje pri vlečenju kristala silicija so prikazane na sl. 2.

3. Trendi tehnologije rasti Si monokristala

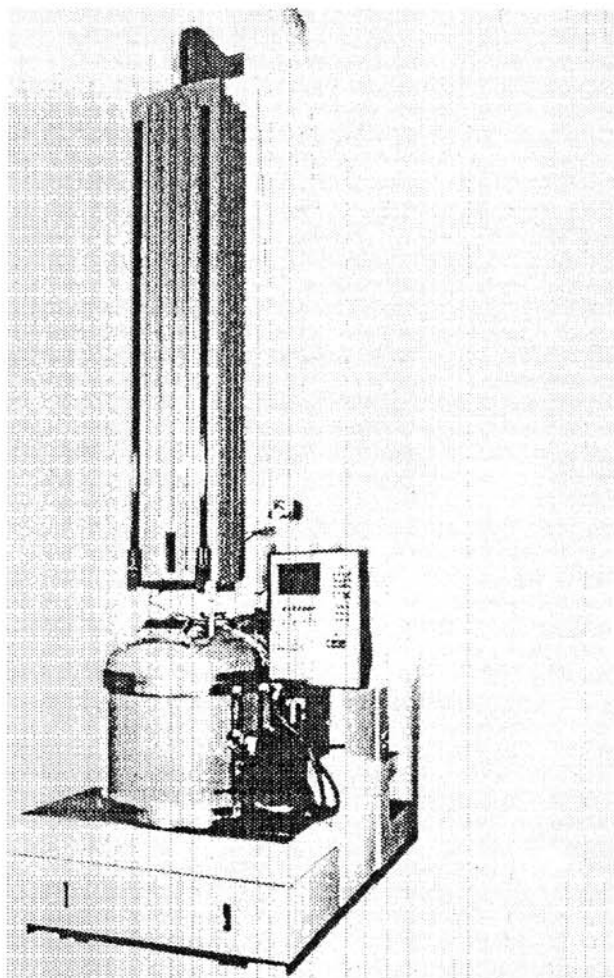
Czochralski metoda rasti monokristala je bila razvita že leta 1916. Takrat so jo uporabljali za študij hitrosti kristalizacije kovin. Metoda je bila v času polprevodniškega napredka zelo izpopolnjena. Danes niso nobena redkost monokristalni ingoti mase 50 in več kg in premera 150 in 200 mm. Izgled procesirane Si rezine s premerom 200 mm vidimo na sl. 3.

Leta 1985 je le nekaj proizvajalcev monokristala vleklo kristal premera 150 mm, rezine iz takšnih kristalov (0,5%) pa so procesirali v redkih firmah na Japonskem in v ZDA (IBM). Dve leti kasneje se je delež teh rezin v proizvodnji zelo povečal, pojavile pa so se že rezine premera 200 mm. Porazdelitev velikosti rezin na ameriškem trgu prikazuje sl.4.

Fizične dimenzije kristala pa nikakor niso edini napredek v rasti Si monokristalov. Za zmogljivejša integrirana vezja, ki imajo vse manjše dimenzije elementov, potrebujemo kvalitetnejše monokristale. Konec petdesetih let in v začetku šestdesetih let so se proizvajalci monokristala Si in rezin ukvarjali predvsem z linijskimi defekti - dislokacijami, ki pa danes ne predstavljajo resnejših težav. Problem so sedaj ostre dopustne tolerance za vsebnost kisika in ogljika v kristalu. Kisik pride v kristal iz kremenovega stekla; le-to se raztaplja v talini Si s hitrostjo približno 7 mm/h. Koliko kisika, ki je v talini, se bo vgradilo v kristal, pa je odvisno predvsem od tega, kakšno je mešanje taline zaradi temperaturnega gradienta in zaradi vrtenja lončka s talino in kristala. Če želimo imeti kontrolirano koncentracijo kisika v kristalu, moramo vse te parametre upoštevati. Zato je tudi razvoj opreme težil k razvoju naprav za vlečenje kristala, kjer se vsi ti parametri računalniško krmilijo. Eno takih naprav vidimo na sl. 5.

Da bi bilo mešanje taline čim manjše in čim bolj kontrolirano, se je v osemdesetih letih pojavila ideja o vlečenju kristala v močnem magnetnem polju (2000-

5000 gaussov). Magnetno polje prepreči gibanje in s tem mešanje tekočine (Lorenzova sila). Teji metodi pravimo MCZ in vse bolj prodira v proizvodnjo Si monokristalov.

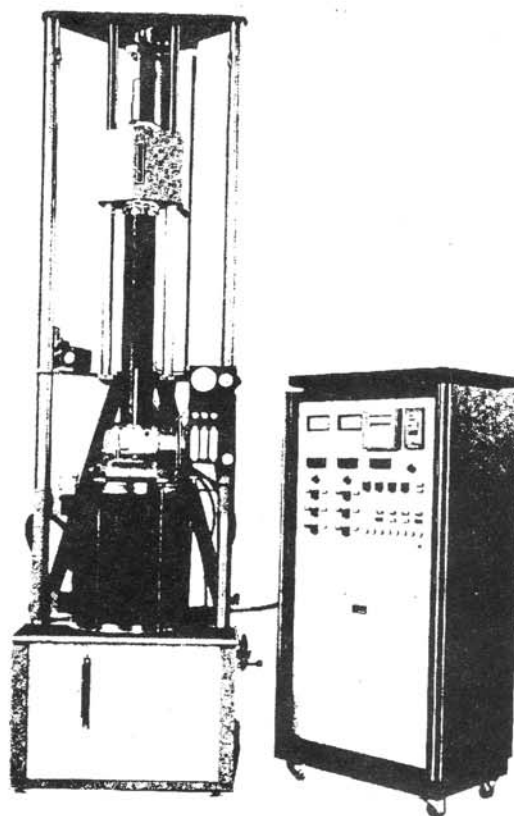


Slika 6: Moderna digitalno računalniško krmiljena naprava za vlečenje kristala po metodi Czochralski

4. Vlečenje silicijevih kristalov v Iskri Polprevodniki-Trbovlje

Začetki vlečenja Si monokristala v Trbovljah segajo v leto 1973. Najprej so vlekli kristale s premerom 50,8 mm (2"), kar je bilo tiste čase na svetovnem nivoju. Oprema je bila razmeroma preprosta, le kontrola temperature je bila avtomatska. Potrebe po cenejšem, kvalitetnejšem materialu in večji produktivnosti so narekovale vlečenje kristalov z večjimi premeri. V letu 1985 smo investirali v novo sodobnejšo opremo s katero smo lahko naslednje leto začeli vleči kristale s premerom 76,2 mm (3") in 100 mm (4"). Proizvajalec opreme je firma CYBEQ iz Kalifornije. Napravo vidimo na sl. 6. Maksimalni premer monokristala silicija, ki ga je možno s to napravo izdelati, je 125 mm (5"), max. teža pa je 20 kg.

Naprava ima avtomatsko kontrolo temperature in premera.



Slika 5: Naprava za vlečenje kristala firme CYBEQ 860 D

Zaključek

Tako kot vsa polprevodniška tehnologija, je tudi vlečenje kristalov doživelo velik napredek. Zaradi procesiranja zahteve po večjih premerih kristalov vsako leto naraščajo. Tako imenovana podmikronska tehnologija (UVLSI) zahteva izredno perfektnost in čistost kristalov. Kje so meje bodočih dosežkov je težko predvidevati.

Literatura

1. W. Zulehner; Czochralski growth of Silicon; Journal of Crystal Growth 65, 1983
2. George Fiegl, Recent Advances and Future Directions in CZ-Silicon Grystal Growth Technology, Solid State Techology, August 1983
3. P. Burggroof, Si Crystal Growth Trends, Semiconductor International, October 1984
4. Howard R. Huff; Fumio Shimmy, Silicon Material Criteria for VLSI Electronics, Solid State Technology, March 1985

Mirko Prosenč
Iskra Elementi
Polpevodniki Trbovlje