

Rodendan tranzistora

Priredila: Đurđica ŠPANIČEK

U današnje vrijeme teško je zamisliti bilo koje područje ljudske djelatnosti bez pomoći računala. Osobna računala postala su dio svakodnevice. A upravo ove godine obilježava se 60 godina od otkrića koje je omogućilo razvoj elektronike.

Istraživački tim fizičara, u kojem su bili John Bardeen, Walter H. Brattain i William Shockley, izumio je 1947. tranzistor. Za svoj izum dobili su 1956. godine *Nobelovu nagradu za fiziku*, što već samo za sebe govori o doprinosu razvoju mnogih područja, prije svega elektronike.

U početku se tranzistor upotrebljavao kao pojačalo u slušnim aparatima i za proizvodnju radioaparata malenih dimenzija, koji su upravo po tom dijelu i dobili popularan naziv *tranzistor* (slika 1).



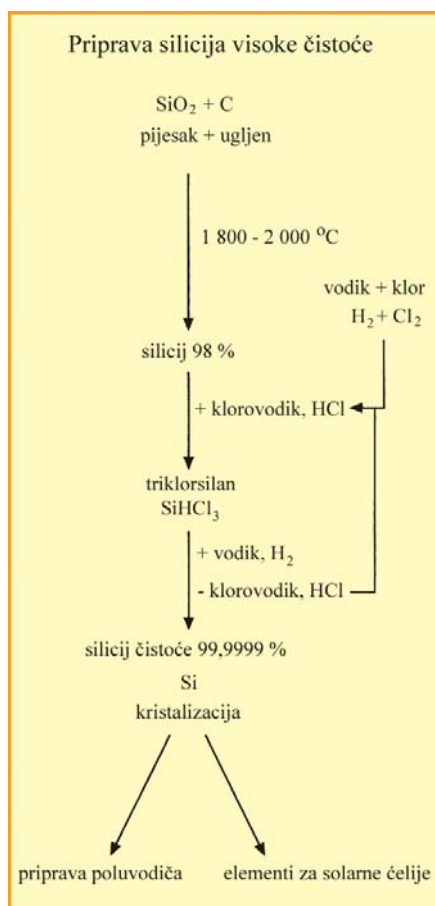
SLIKA 1. Tranzistor iz 1959. godine¹

Već u 50-ima prošlog stoljeća američka vojska, a posebno svemirski programi, zahtijevaju savršeniju elektroničku opremu, jer su uređaji bili preglomazni. *ENIAC* (e. *Electronic Numerical Integrator and Computer*), glomazno proračunalo iz 1945. godine, bio je velik, crn i zauzimao je prostor veličine plesne dvorane. Bio je mase oko 30 tona, dugačak 24 metra, visok 5,5 metara, a sastavljen od preko 100 000 elektroničkih dijelova, za čije je napajanje bilo potrebno čak 17 468 elektronskih cijevi. Programiranje *ENIAC*-a trajalo je oko dva dana i tada bi radio za ono vrijeme golemom brzinom od 100 000 operacija u sekundi. Danas svako osobno računalo ima mogućnost obavljanja 2 do 3 milijuna operacija u sekundi zahvaljujući nosačima mikroprocesora, čipovima od čistog silicija (slika 2).



SLIKA 2. Usporedba veličine DRAM čipa od 4 i 16 Mbita s poštanskom markom²

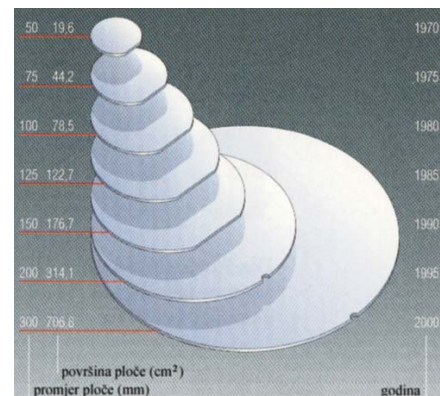
Istraživači su otkrili mogućnost da se čisti silicij, koji je poluvodič, učini vodljivim s pomoću postupka koji se naziva *dotiranje* (e. *dot* – mrlja). Unošenje neznatne količine nekoga drugog elementa, jednog atoma na nekoliko milijuna atoma silicija, omogućuje siliciju da od poluvodiča postane vodič. Za pripremu mikroprocesora potreban je silicij čistoće 99,9999 %. Takva se čistoća dobiva u višestupanjskom procesu pročišćavanja (slika 3).



SLIKA 3. Shema postupka dobivanja silicija visoke čistoće za elektroniku i sunčeve ćelije (3)

Pretvorbom 98 % silicija uz djelovanje klorovodika (kloridne kiseline) nastaje triklorosilan (SiHCl_3) vrlo niskog vrelišta od 33 °C. U destilacijskim kolonama uparuje se triklorosilan i kondenzira sve dok se ne uklone ostale tvari. Konačno se pare triklorosilana provode s vodikom iznad ugrianih silicijevih štapova. Silicij se taloži, a nastali klorovodik ponovno vraća u proces. Tijekom prvog desetljeća proizvodnja silicijeva monokristala, zbog primjene za elektroničke uređaje, porasla je od desetaka kilograma na dvadesetak tona na godinu. Do tada prilično nevažan

element, silicij, drugi element po zastupljenosti u Zemljinoj kori, odjednom je postao veoma važnim. Ali trebalo je od silicija dobiti poluvodičke ploče, a velik dio procesa unapređivanja djelovanja tranzistora čine upravo usavršeni postupci dobivanja ploča i njihove površinske obrade (slika 4).



SLIKA 4. Promjena veličine poluvodičke ploče tijekom vremena¹

Već početkom 60-ih godina prošlog stoljeća, točnije 1959., tvrtka *Texas Instruments* predstavila je prvi *integrirani krug*, nazvan skraćeno *IC* (e. *integrated circuit*), koji sadržava cijele funkcionalne skupine koje se sastoje od više tranzistorskih funkcija ujedinenih na jednom komadiću silicijeva monokristala čipu.

Taj je izum gotovo jednako važan kao i izum tranzistora, jer je upravo pronalazak postupka pravljenja *IC*-a omogućio razvoj industrije računala, što je razvidno iz sljedećeg primjera. Suvremeni uređaji kapaciteta od 64 MB imaju podjednako velik broj tranzistorskih funkcija na jednom čipu!

Veliki napredak proizvodnje *IC*-a radi smanjenja dimenzija uređaja omogućio je primjenu optičkih postupaka i za *offset*-tisk. Kako funkcija tranzistora nastaje zbog lokalne difuzije različitih dotirajućih atoma, potrebno je površinu silicijeva kristala tako prekriti da samo na strogo predviđenim mjestima nastaju otvori za dotirajuće atome, koji onda samo na tim mjestima ulaze u silicij pa se tako stvaraju i vrlo komplikirani uzorci tiska. To se postiže tako da se najprije površina silicija pokrije oksidnim slojem, koji se zatim fotoprocenom otvara na točno određenim mjestima. Na tim mjestima dotirajući atomi prodiru u silicij i uz obradu pri visokim temperaturama prodiru dalje u materijal kako bi se postiglo željeno dotirano područje i kompleksne električne funkcije. Iz ovoga pojednostavnjenog opisa

vidljivo je kako su se s uvođenjem proizvodnje IC-a bitno promijenili zahtjevi na silicij, jer se sve odigrava na površini Si ploče.

Ukupne funkcije jednog IC dijela ugrađene su u Si ploču na dubinu manju od tisućinke milimetra. S time je mehanička obrada pri pripravi ploča, prije svega poliranje, postala od odlučujuće važnosti. Iz tog je razloga početkom 70-ih godina prošlog stoljeća razvijeni novi postupak za dobivanje osnovnog Si materijala, koji je po svom pronalazaču nazvan *Czochralskijev postupak* ili kraće *CZ postupak*. Razlika u odnosu na prethodni postupak jest u tome što se silicij dobiva taljenjem u posudama od kvarca (SiO_2), pri čemu agresivna taljevina silicija može *povući* i dio SiO_2 od stijenki posude. Zbog toga u silicij ulazi i kisik kao onečišćenje u količini do 10 ppm. Ustanovilo se da je upravo ta nečistoća, kisik, pogodna za integrirane krugove. Pri visokim temperaturama IC procesa ($\geq 1000^\circ\text{C}$) atomi kisika su pokretljivi, difundiraju u površinskom sloju i kroz površinu ploče izlaze iz ploče. Na taj način u siliciju nastaje područje dubine tisućinke milimetra koje je potpuno slobodno od kisika, ali u unutrašnjosti postoji još visoka koncentracija kisika pa, ako se takva ploča procesira, u unutrašnjosti nastaju kristalni defekti, dok je površina bez defekta. Upravo takav način rasporeda defekata ima pozitivan utjecaj na pripremu integriranih krugova jer nedostaci iz unutrašnjosti mogu *usisati* nečistoće iz površinskoga aktivnog sloja.

Pravljenje integriranih krugova od početka se razvijalo u dva smjera: izmjere pojedinačne tranzistorske funkcije postajale su sve manje, dok je čip istodobno postajao sve veći. Tek je na taj način bilo moguće smjestiti oko 64 milijuna tranzistorskih funkcija na jedan čip. S porastom promjera ploča razvijeni su novi postupci njihova rezanja i poliranja. Ti su postupci stalno usavršavani kako bi pojedinačni tranzistori bili što manji i osjetljiviji (slika 5).

To je dovelo do novog izuma u modernoj elektronici. Prvobitni tranzistor bio je označen kao *bipolaran* jer je za njegovo funkcioniranje bila potrebna kombinacija *n* i *p* dotiranih područja silicija. Nova vrsta tranzistora nazvana je *MOS* (e. *Metal-Oxide-Semiconductor*) tranzistori. Najpoznatija primjena novog *MOS* tranzistora su kvarcni ručni satovi, koji su potkraj 70-ih godina prošlog stoljeća osvojili tržište. Poslije je uvedena i *CMOS* varijanta (e. *complimentary MOS*), koja je do danas vodeća na području poluvodiča. Razvoj postupka pravljenja IC-a i *MOS* tranzistora ušao je potkraj 60-ih godina prošlog stoljeća u poznatu fazu koja je u SAD-u dovela do procvata u *Silicijskoj dolini* u Kaliforniji.

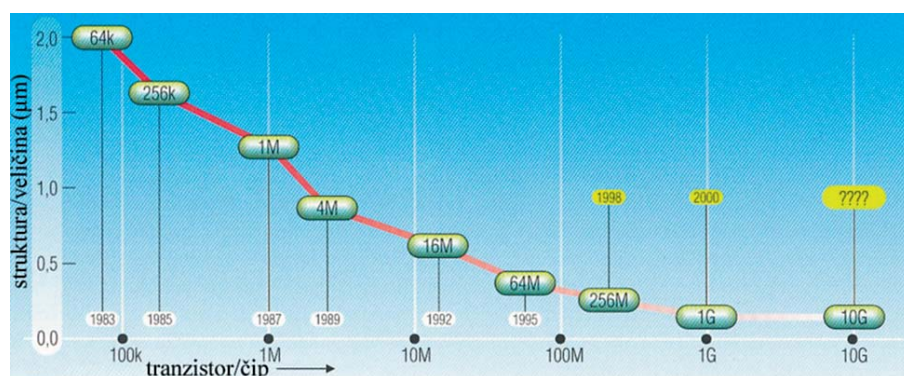
Tijekom daljnjeg razvoja omogućeno je integriranje više od milijun funkcija primjenom *DRAMS*-a (e. *Dynamic Random Access Memory*), čime je počela megaera u industriji poluvodiča. Za daljnji napredak bile su po-

trebne poluvodičke ploče, *vaferi*, promjera 200 mm i više. S porastom gustoće integriranja mijenjali su se ostali parametri. Tako je npr. razmak između linija na površini poluvodičke ploče s 1 Mbit iznosio $1\ \mu\text{m}$, dok je za one s 256 Mbit smanjen na samo $0,25\ \mu\text{m}$. S proizvodnjom ploča promjera 300 mm ušlo se u gigapodručje (slika 6). Kristali za takve poluvodičke ploče vafere dobivaju se izvlačenjem iz taljevine i mogu dosegnuti masu i do 300 kg polisilicija.

Usporedno su razvijeni i novi postupci rezanja i poliranja ploča. Mikrostruktura polirane površine mora dopustiti kontrolu mogućih pogriješaka do veličine $0,08\ \mu\text{m}$. Usavršeni su i postupci završnog čišćenja, što je također bio velik izazov. Čistoća prostora u kojima se zbivaju takvi postupci podijeljena je u 10 klasa. Za najzahtjevniju klasu dopušteno je po kubičnoj stopi (američki propisi!) prostora najviše 10 čestica nečistoće veličine do $0,3\ \mu\text{m}$. Za usporedbu: čisti zrak u planinama ili slabo nastanjenim morskim mjestima sadržava oko 100 000 čestica te veličine. To dovoljno govori o zahtjevnosti postupka čišćenja.

Razvijeni su i epitaktni materijali, specifični električni otpor kojih, zbog njihove namjene, treba biti uz površinu ploče oko 1 000 puta viši negoli u unutrašnjim slojevima supstrata. To se postiže nanošenjem vrlo tankog sloja silicija na supstrat jednake kristalne strukture. Odgovarajuća temperatura procesa i vrlo polagano odvajanje omogućuju sređivanje kristalne strukture supstrata. Specifični električni otpor postiže se dodavanjem plinovitog oblika odgovarajućeg materijala za dotiranje.

U šezdeset godina od pronalaska tranzistor je prošao dug i uspješan put. Gotovo je nemoguće zamisliti funkcioniranje suvremenog društva bez njega: transport, informacije, mnoga područja proizvodnje, mobilni telefoni, sofisticirani medicinski i ostali uređaji, sve je to povezano s vrlo malenim (po dimenzijama), ali nezamjenjivim čipom. Dimenzije su s vremenom postajale sve manje, a broj spremljenih podataka sve veći. I teško je predvidjeti gdje su granice razvoja.



SLIKA 5. Evolucija odnosa strukture i veličine čipa²



SLIKA 6. Čisti silicij (lijevo) i konačni proizvod poluvodička ploča (desno)⁴

LITERATURA

1. Reffle, J.: *Die Geburtsstunde des Chips*, Wacker, Werk+Wirken 48(1997)4, 15-17.
2. Reffle, J.: *Kilo, Mega und jetzt Giga*, Wacker (1998)1, 10-19.
3. Bayer, Chemie mit Chlor 1995, 63-67.
4. Beck, A.: *Wachsen mit dem Halbleiterboom*, Wacker, Werk+Wirken 47(1996)2, 6-9.