

ISTORIJA RAZVOJA INTEGRISANIH KOLA

Milena Zogović¹

Ključne riječi: *istorija integrisanih kola, razvoj integrisanih kola*

SAŽETAK:

U radu je dat pregled najznačajnijih događaja i ličnosti koji su obilježili razvoj integrisanih kola. Opisan je intenzivan razvojni put od vakumskih cijevi, preko diskretnih komponenti do integrisanog sistema na čipu.

1. UVOD

Pretaču tranzistora predstavljaju vakumske cijevi. Nedostaci vakumskih cijevi su brojni: dimenzije, osjetljivost, generišu veliku količinu toplote prilikom rada, mala brzina itd. Prvi pokušaj realizacije kompleksnog sistema koji se zasnivao na vakumskim cijevima pokazao je sve njihove loše strane. ENIAC je bio prvi računar koji je imao masu preko trideset tona i trošio oko 200 kW. Ovaj računar sastojao se od oko 18000 vakumskih cijevi koje su konstantno pregorijevale čineći ga veoma nepouzdanim. Iz prethodnog je jasno da je otkriće tranzistora iz 1947. godine predstavljalo neku vrstu revolucije u ovoj oblasti. U poređenju sa vakumskom cijevi, diskretni tranzistor je znatno manjih dimenzija, znatno brži, efektivniji i pouzdaniji.

Sa otkrićem diskretnog tranzistora izgledalo je da su svi problemi koji su postojali sa vakumskim cijevima riješeni i da se može pristupiti realizaciji mnogo naprednijih uređaja bez većih poteškoća. Međutim, prilikom prvih pokušaja konstruisanja složenijeg sistema uočeni su značajni problemi, kao što su: veliki broj provodnih linija, dimenzije kola, mala brzina rada i slično. Dakle, postojao je niz poteškoća - složeni sistemi zahtijevali su veliki broj komponenti sa velikim brojem veza koje je gotovo bilo nemoguće ostvariti bez greške, dok je dužina provodnih linija ograničavala brzinu cjelokupnog sistema.

Tokom ljeta 1958. godine *Jack Kilby* je radio na svojoj ideji da sve komponente kola smjesti u poluprovodnik, a slojem metala uspostavi provodne veze. U septembru 1958. godine, on je prezentovao svoje prvo integrisano kolo.

¹ mr Milena Zogović, Elektrotehnički fakultet u Podgorici, zmilena@ac.me

Postepeno, veliki broj diskretnih elektronskih komponenti zamijenila su integrisana kola. Osnovne prednosti integrisanih kola nad diskretnim realizacijama su performanse i cijena. Performanse integrisanih kola su izuzetne obzirom na činjenicu da su komponente veoma malih dimenzija i na bliskom rastojanju, potrošnja je veoma mala dok se istovremeno mogu postići visoke frekvencije rada. Cjelokupan sistem smješten je na jednom čipu, dakle, nije potrebno proizvoditi osnovne elemente pojedinačno, što značajno utiče na cijenu kada je u pitanju serijska proizvodnja.

Poslije oko pola vijeka od prvog integrisanog kola, ona su postala svugdje prisutna. Računari, mobilni telefoni, kao i mnogi drugi električni uređaji su dio svakodnevnice savremenog čovjeka. Proizvodni sistemi, komunikacioni i računarski sistemi, transportni sistemi počivaju i zavise od integrisanih kola. Otkriće integrisanog kola može se svrstati u red najznačajnijih u savremenoj istoriji.

Integrisana kola mogu se podijeliti na analogna, digitalna i kombinovana (analogno-digitalna) kola.

Digitalna integrisana kola mogu sadržati od nekoliko hiljada do nekoliko miliona flip-flopora, multipleksera ili logičkih kapija na nekoliko kvadratnih milimetara. Male dimenzije ovih sistema omogućavaju veoma visoke frekvencije, malu potrošnju i nisku cijenu, u poređenju sa diskretnim realizacijama. Digitalna integrisana kola, kao što su mikroprocesori i procesori za digitalnu obradu signala (DSP), počivaju na zakonima binarne aritmetike, dakle rade sa dva naponska nivoa koji odgovaraju logičkoj nuli, odnosno, logičkoj jedinici.

Analogna integrisana kola imaju funkciju procesiranja signala koji se kontinualno mijenjaju u vremenu, a predstavljaju struju, napon ili naelektrisanje. Za razliku od digitalnih kola, gdje postoje visoki i niski naponski nivo (logička nula i logička jedinica), analogni signal ima teorijski beskonačnu rezoluciju. Iz tog razloga, dizajner analognog integrisanog kola mora da vodi računa o šumu, kao i o nelinearnostima pojedinih analognih blokova koje imaju nasljedan karakter.

Analogno integrisano kolo podrazumijeva integraciju cjelokupnog sistema na jednom čipu, dakle izdvajanje pojedinih elemenata nije moguće, što ga i razlikuje od diskretnog kola. Dizajner analognog integrisanog kola mora da uzme u obzir opseg vrijednosti, odnosno, toleranciju vrijednosti za pojedine veličine u odgovarajućoj tehnologiji. Neki od primjera analognih integrisanih kola su operacioni pojačavači, razni izvori napajanja, senzori itd.

Analogna i digitalna integrisana kola mogu se kombinovati u jedinstven analogno-digitalni sistem na čipu.

2. PREGLED ZNAČAJNIH DOGAĐAJA KOJI SU OBILJEŽILI RAZVOJ INTEGRISANIH KOLA

1833. godine uočeni su prvi poluprovodnički efekti. Naime, *Michael Faraday* je proučavajući uticaj temperature na sulfid srebra, primijetio da se provodnost povećava sa povećanjem temperature. Ovaj efekat, tipičan za poluprovodnike, suprotan je ponašanju metala u smislu provodnosti sa povećanjem temperature.

U svojoj knjizi "*Experimental Researches in Electricity*", *Faraday* je napisao: "Upravo sam se susreo sa čudnom pojavom... koja je u direktnom kontrastu sa uticajem toplote na metalna tijela... Primjenom lampe... provodnost se ubrzano povećava sa porastom temperature... Uklanjajući lampu tj. smanjujući temperaturu, efekat je suprotan."

1874. godine njemački fizičar *Ferdinand Braun* je uočio ispravljački efekat na spoju metala i određenih kristala. *Braun* je demonstrirao svoje zapažanje 1876. godine, ali ono nije imalo nikakvu praktičnu primjenu sve do pojave radija početkom XX vijeka, kada je ispravljač korišćen kao detektor signala. *Braun* je više poznat po razvoju CRT osciloskopa 1897. Iz tog razloga, katodna cijev je u Njemačkoj poznata i kao *Braun*-ova cijev. *Ferdinand Braun* je, 1909. godine, podijelio Nobelovu nagradu sa *Guglielmo*-om *Marconi*-jem za doprinos razvoju bežične telegrafije, uglavnom za razvoj pojačavačkih kola za radio prijemnike.

Jagadis Chandra Bose, profesor fizike na *Presidency* Koledžu u Kalkuti, demonstrirao je upotrebu galenita povezanog sa metalnim nitima za detekciju elektromagnetnih talasa. On je, 1901. godine, izdao patent za *point-contact* poluprovodnički ispravljač za detekciju radio signala.

Između 1902. i 1906. godine, američki inženjer elektrotehnike *Greenleaf Pickard* testirao je hiljade uzoraka minerala da bi utvrdio njihova ispravljačka svojstva. Nakon toga, on je osnovao kompaniju za proizvodnju tzv. "*cat's whisker*" kristalnih radio detektora. Njegova kompanija je najvjerovatnije prva koja se bavila proizvodnjom i prodajom poluprovodničkih uređaja.

Usljedio je niz pokušaja da se ostvare bolje karakteristike poluprovodničkog ispravljača, upotrebom novih vrsta poluprovodničkih materijala. Međutim, sve do Drugog svjetskog rata, dominantno su korišćene vakumske cijevi. Tek u periodu rata, mogućnost rada na frekvencijama mikrotalasa uvela je na velika vrata upotrebu poluprovodnika u oblast radio-tehnike.

Poljsko-američki fizičar *Julius Lilienfeld* 1926. godine patentirao je "metod i aparaturu za kontrolisanje električne struje" u kome je predložio tro-elektrodnu strukturu koja koristi sulfid bakra kao poluprovodnički materijal. Danas bi se ovaj uređaj mogao nazvati tranzistor sa efektom polja. Dok je radio na Kembridž Univerzitetu 1934. godine, njemački inženjer elektrotehnike *Oskar Heil* izdao je patent o kontroli strujnog toka u poluprovodnicima. Međutim, nije zabilježeno da su *Lilienfeld* ili *Heil* uspjeli da realizuju praktično svoje ideje.

Iako nisu praktično realizovane, ideje *Lilienfeld*-a i *Heil*-a su poslužile *William*-u *Shockley*-ju da otpočne rad u ovoj oblasti. U decembru 1939. godine, on je zapisao: "Danas mi je postalo jasno da je pojačavač baziran na poluprovodniku, ne na vakumskim cijevima, u principu moguć". Po njegovim uputstvima, *Walter Brattain* i mnogi drugi izvodili su niz eksperimenata sa takvim tro-elektrodnim poluprovodničkim uređajima, ali nisu ostvarili pojačanje. Po svom povratku u *Bell*-ovu laboratoriju, poslije rata 1945. godine, *Shockley* se vratio radu sa poluprovodnicima, ali je opet zabilježio neuspjeh.

Riječ poluprovodnik prvi put je upotrijebljena 1911. godine da opiše materijale koji imaju svojstvo električne provodnosti između metala i izolatora. Međutim, decenijama je izostajalo potpuno objašnjenje ponašanja poluprovodnika. Čak 1931. godine, fizičar *Wolfgang Pauli* je i dalje sumnjao da poluprovodnici uopšte postoje.

Dok je radio na *Werner Heisenberg* institutu u Lajpcigu, fizičar Kembridž Univerziteta *Alan Wilson* adaptirao je kvantnu teoriju čvrstog stanja za kreiranje modela za proučavanje svojstava poluprovodnika. On je objasnio "neobično" ponašanje poluprovodnika prisustvom atoma

nečistoća u čistom kristalu. 1932. godine *Wilson* je takođe pokušao da objasni ispravljačko svojstvo *point-contact* ispravljača na bazi kvantno-mehaničkog tunelovanja od metala prema poluprovodniku i obratno. Međutim, već narednih godina pokazalo se da je njegovo objašnjenje pogrešno.

Zadovoljavajuća objašnjenja ispravljačkog svojstva poluprovodnika dali su 1938. godine *Boris Davydov* na *Ioffe* Fizičko-Tehničkom Institutu Ruske Akademije Nauka, zatim *Nevill Mott* na Bristol Univerzitetu i *Walter Schottky* u Simensu, nezavisno.

Sredinom tridesetih godina dvadesetog vijeka, elektrohemijačar *Russell Ohl* je, u *Bell*-ovoj laboratoriji, počeo sa istraživanjima o mogućnosti upotrebe silikonskih ispravljača u radarskim sistemima. Uočio je da se sa povećanjem čistoće silicijuma povećava detektorska moć radara. Februara 1940. godine, on je testirao mali komad silicijuma, što je dovelo do iznenađujućih rezultata. Naime, ukoliko se komad silicijuma izloži jakoj svjetlosti, struja koja teče se u značajnoj mjeri povećava. *Ohl* i njegov kolega *Jack Scaff* su uočili da dolazi do izdvajanja regiona u komadu silicijuma koji sadrže različite vrste nečistoća. Prisustvo fosfora, kao nečistoće, dovodi do viška elektrona u silicijumu, dok atomi bora izazivaju nedostatak elektrona odnosno prisustvo šupljina. Oni su ove regione označili kao poluprovodnik n-tipa (*negative*) i p-tipa (*positive*). Površina gdje se poluprovodnici n-tipa i p-tipa srijeću, poznata pod nazivom barijera, predstavlja pn spoj. Usmjeren svjetlost dovodi do prelaska elektrona sa n strane na p stranu što rezultuje električnom strujom. Foto-naponski efekat koji je uočio *Ohl* se i danas koristi za solarne ćelije.

William Shockley-jev koncept spojnog tranzistora od 1948. godine upravo je zasnovan na *Ohl*-ovom otkriću. Pn spoj je postao najčešće upotrebljavano ispravljačko kolo u elektronskoj industriji i osnova poluprovodničke tehnike.

Ohrabren od strane bivšeg izvršnog direktora *Mervin-a Kelly*-ja, *William Shockley* se vratio od svojih ratnih zadataka, početkom 1945. godine, da organizuje grupu za fiziku čvrstog stanja u *Bell*-ovoj laboratoriji. Između ostalog, ova grupa se bavila istraživanjima o mogućnostima uvođenja poluprovodnika umjesto nepouzdanih vakumskih cijevi i elektromehaničkih prekidača koji su tada korišćeni u telefonskim sistemima. Tog aprila, *Shockley* je realizovao pojačavač i prekidač sa efektom polja pomoću germanijuma i silicijuma, koje je razvijao tokom rata, ali rezultat je bio gori od očekivanog. Godinu kasnije, teorijski fizičar *John Bardeen* je ukazao na mogućnost da elektroni na površini blokiraju penetraciju električnog polja ka unutrašnjosti, poništavajući bilo kakve efekte. Sa eksperimentalnim fizičarom *Walter Brattain*-om, *Bardeen* je otpočeo istraživanje tih "površinskih stanja".

16.-og decembra 1947. godine njihovo istraživanje je rezultiralo prvim poluprovodničkim pojačavačem na bazi čistog germanijuma, sa pojačanjem do 100 puta. 23. decembra, oni su demonstrirali svoje otkriće, što je *Shockley* ocijenio kao "izvrstan božićni poklon".

Bell-ova laboratorija je objavila svoje revolucionarno otkriće pod nazivom "tranzistor" na konferenciji za štampu u Nju Jorku, juna 1948. godine. Tada je saopšteno da će tranzistor imati značajnu i dalekosežnu ulogu u elektronici i komunikacionim sistemima. Uprkos njenoj masivnoj konstrukciji, tranzistor "tipa A" je proizveden u hiljadama primjeraka.

Poslije otkrića *Bardeen*-a i *Brattain*-a u decembru 1947. godine, *Shockley* je otpočeo sa intenzivnim teorijskim istraživanjima. Januara 1948. godine, on je uveo potpuno novi tip tranzistora baziran na pn spoju. Djelimično motivisan profesionalnom ljubomorom, jer nije bio uključen u istraživanja *Bardeen*-a i *Brattain*-a, on je ukazao da njihov tranzistor nije

moguće sa dovoljnom pouzdanošću proizvoditi u velikim serijama zbog velike mehaničke osjetljivosti.

Shockley se takođe nije slagao sa *Brattain*-ovim objašnjenjem kako njihov tranzistor funkcioniše. On je tvrdio da pozitivno naelektrisane šupljine, takođe mogu prodrijeti u germanijumsku podlogu, a ne samo "curiti" po površinskom sloju. Na bazi *Shockley*-jevog objašnjenja funkcionišu i današnji bipolarni tranzistori.

16.-og februara 1948. godine, fizičar *John Shive* je ostvario funkciju tranzistora pomoću komadića germanijuma kome je sa suprotnih strana doveo kontakte, pokazavši da šupljine zaista "protiču" kroz germanijum. *Shockley* je patentirao svoj spojni tranzistor juna iste godine, dok je detaljnu teoriju objavio 1949. godine. Ipak je bilo potrebno još dvije godine da se u *Bell*-ovoj laboratoriji pronađe model za masovnu proizvodnju ovih tranzistora.

1947. godine *Mataré* je otpočeo sa istraživanjem čudnog fenomena koji je označavao kao "interferencija", a koji je primijetio dok je radio na poluprovodničkim ispravljačima za potrebe Drugog svjetskog rata. Naime, primijetio je da ukoliko su dva kontakta na dovoljno malom rastojanju, reda 100 μm , potencijal jednog može uticati na struju drugog, slično *Bardeen*-ovom i *Brattain*-ovom zapažanju. Početkom naredne godine *Mataré* je ostvario pojačavačke efekte, a pomoću čistijeg *Welker*-ovog germanijuma, veoma dobre rezultate za moguću proizvodnju. Međutim, već narednog mjeseca čuli su razočaravajuću vijest da je *Bell*-ova laboratorija otkrila sličan poluprovodnički pojačavač. Kompanija je pokušala da požuri sa proizvodnjom, čak i da objavi svoj tranzistor pod nazivom "*transistron*". Tako je, sredinom 1949. godine, na hiljade njih korišćeno u telefonskom sistemu Francuske. Međutim, uskoro su *point-contact* tranzistori zamijenjeni spojnim tranzistorima i *Herbert Mataré* i *Heinrich Welker* su odustali od borbe.

Nakon što je *Shockley*-jeva teorija o pn spoju eksperimentalno potvrđena, proizvodnja spojnog tranzistora je predstavljala izuzetan izazov. Osnovni problem je bilo nepostojanje čistog, uniformnog poluprovodničkog materijala.

Uz veoma slabu podršku od strane menadžmenta *Bell*-ove laboratorije, *Teal* je opremio laboratoriju za proučavanje kristalne strukture poluprovodničkih materijala. Na bazi tehnike koju je razvio poljski hemičar *Jan Czochralski*, on je uspio da formira jedinstven kristal, visoke čistoće.

Upotrebom tehnike koju je razvio *Teal*, hemičar iz *Bell*-ove laboratorije *Morgan Sparks*, proizveo je pn spoj dodajući malu količinu nečistoća. *Teal* je 1951. godine odlučio da doda dva tipa nečistoća u svoj kristal - p i n tipa i na taj način ostvario prvi spojni npn tranzistor sa tankim središnjim slojem tj. bazom. Ovaj tranzistor bio je po svojim performansama znatno bolji od prethodnih *point-contact* tranzistora, što je *Shockley* i objavio juna iste godine na konferenciji za štampu.

U kasnim četrdesetim i početkom pedesetih, *Bell*-ova laboratorija je sprovodila intenzivan program "fundamentalnog razvoja" u poluprovodničkoj tehnologiji. Vođen od strane inženjera elektrotehnike *Jack-a Morton-a*, ovaj program je pomagao proces dobijanja čistih poluprovodnika, a odnosio se i na dobijanje pn spoja, kao i vezivanje metalnih kontakata za poluprovodnik.

Morton se trudio da tehnologiju razvijenu u *Bell*-ovoj laboratoriji, što je moguće više, učini poznatom i drugim istraživačkim centrima i kompanijama, jer je *Bell*-ova laboratorija za svoj patent dobijala prihod od bilo kakvog korišćenja istog. Organizovani su i boravci istraživača u *Bell*-ovoj laboratoriji u cilju upoznavanja sa novom tranzistorskom tehnologijom. Tako je aprila 1952. godine, preko 100 predstavnika oko četrdeset

kompanija, došlo da prisustvuje "Transistor Technology Symposium-u", i da obide moderni proizvodni pogon u Allentown-u, Pensilvanija. Zbornik ovog simpozijuma pod nazivom "The Transistor", postao je biblija poluprovodničke industrije pedesetih godina.

Tokom pedesetih godina, poluprovodnički uređaji su postepeno počeli da zamjenjuju vakumske cijevi u digitalnim računarima. Do 1960. godine, svi novi uređaji u potpunosti su se zasnivali na tranzistorima.

Novembra 1953. godine, Richard Grimsdale i Douglas Webb, pod nadzorom Tom-a Kilburn-a na Mančester Univerzitetu, demonstrirali su računar u potpunosti baziran na tranzistorima. Četrdeset osmo-bitnu mašinu činilo je 92 tranzistora i 550 dioda koje je proizvodila firma STC, ogranak ITT-a u Velikoj Britaniji. Poboľšana verzija sa 250 tranzistora proizvedena je 1955. godine. Metropolitan Vickers Electrical Company je proizvela šest ovih računara poznatih kao Metrovick 950, koji su se komercijalno koristili od 1956.

Istovremeno, pod rukovodstvom Jean H. Felker-a, tim Bell-ove laboratorije, uključujući i inženjera James R. Harris-a, dizajnirao je i za potrebe Vazduhoplovstva Ujedinjenih Država izgradio TRADIC (TRAnsistor Digital Computer). TRADIC je činilo oko 700 tranzistora, preko 10000 dioda, a prototip je radio na 1 MHz i trošio manje od 100 W. U narednom periodu, članovi grupe MIT Linkoln Laboratorije, upotrebom germanijumskih tranzistora, proizveli su računar na 5 MHz, poznat kao TX-0 (Transistor Experimental). Tokom 1956, prvi japanski računar - ETL Mark III, koji je sačinjavalo 130 tranzistora i 1800 dioda, sagrađen je u Elektrotrenhičkoj laboratoriji u Tokiju, pod nadzorom Hiroshi Wada.

Prvih šest godina svoga postojanja, tranzistori su se proizvodili od germanijuma. Iako je ovaj element pogodniji za rad od silicijuma i pomoću njega se mogu ostvariti bolje frekventne karakteristike, struje curenja su izraženije. Germanijumske komponente su takođe ograničene na rad u opsegu temperatura od 0 °C do 70 °C, dok se uz pomoć silicijuma može ostvariti upotrebljivost na temperaturama od -55 °C do 125 °C.

U januaru 1954. godine, hemičar Bell-ove laboratorije Morris Tanenbaum je proizveo prvi silicijumski tranzistor uz pomoć tehnike koju su koristili Morgan Sparks i Gordon Teal. Međutim, laboratorija nije nastavila sa serijskom proizvodnjom, što je dalo vremena Texas Instruments-u da to ostvari nekoliko mjeseci kasnije. Naime, Teal je već bio napustio Bell-ovu laboratoriju i pokušao da organizuje sopstveni tim u Texas Instruments-u, koji bi radio na silicijumskim tranzistorima. U aprilu 1954. godine, uspjeli su da realizuju svoj prvi npn tranzistor. Nesvjestan Tanenbaum-ovog posla, Teal je predstavio svoje ostvarenje u maju iste godine na konferenciji u Dejtonu, objavljujući da su silicijumski tranzistori u proizvodnji i dostupni u prodaji. Texas Instruments (TI) je dominirao tržištem nekoliko narednih godina. Do kraja pedesetih silicijum je postao dominantno korišćen poluprovodnički materijal.

Početkom 1952. godine, hemičar Calvin Fuller pokazao je da se dodavanje nečistoća u poluprovodnik može ostvariti izlaganjem istog visoko-temperaturnom gasu koji sadrži željene dopante. Podešavajući vrijednost temperature i vrijeme izlaganja, on je mogao da kontroliše količinu unešenih nečistoća, kao i dubinu njihove penetracije sa preciznošću od jednog mikrona, što je znatno bolje u odnosu na tehniku Gordon-a Teal-a.

Fuller je sa svojim timom, početkom 1954. godine, izvršio difuziju sloja atoma bora u silicijum n-tipa, formirajući veoma širok pn spoj neposredno ispod površine. Osvjetljavajući ovaj spoj, prema foto-električnom efektu, generiše se električna struja. Bell-

ova laboratorija objavila je svoju "solarnu bateriju" aprila 1954. Kasnije iste godine, *Charles Lee* koristio je postupak difuzije za proizvodnju tranzistora čija je baza debljine svega jedan mikron. Ovaj tranzistor radio je deset puta brže od njegovih prethodnika - do 170 MHz. U martu 1955, upotrebom silicijumskih vafera u koje je *Fuller* difuzijom unio dva tipa nečistoća da bi formirao troslojnu npn komponentu, *Morris Tanenbaum* je proizveo silicijumski tranzistor na bazi difuzionog postupka. U januaru 1956. godine, *Bell*-ova laboratorija održala je simpozijum posvećen tehnikama difuzije.

Početak 1955. godine, istraživači u *Bell*-ovoj laboratoriji imali su značajan problem s nagrizanjem površine silikonskih vafera u toku visoko-temperaturne difuzije. Ovaj problem je riješen od strane hemičara *Carl-a Forsch-a* u toku nezgode u kojoj se hidrogen gas na kratko zapalio u toku procesa dopiranja difuzijom u blizini difuzione peći unoseći na taj način vodenu paru u komoru. Kao rezultat, dobijen je staklasti sloj silicijum-dioksida na površini poluprovodnika.

Razvijana dalje od strane *Frosch-a* i njegovog pomoćnika *Lincoln-a Derick-a*, ova tehnika omogućila je zaštitu silicijumskih vafera u toku procesa difuzije. Oni su pokazali da nečistoća kao što je galijum može da proдре kroz oksidni sloj, dok bor i fosfor ne mogu. Oni su takođe pokazali kako je moguće ostvariti male otvore u sloju oksida kako bi nečistoće difundovale u određeni region silicijumske podloge i formirali dovoljno male regione n ili p tipa. 1957. godine oni su patentirali i objavili svoju izuzetno značajnu tehniku.

Sloj silicijum-dioksida je uskoro postao esencijalan u proizvodnji tranzistora i kasnije integrisanih kola kroz planarni metod, koji koristi ovaj sloj da zaštiti osjetljive pn spojeve u silicijumu. Takođe se koristi i kao izolacioni sloj na koji se dovode metalni kontakti kod MOSFET-a. Upravo je njegov oksid - SiO_2 jedan od najznačajnijih argumenata koji čini silicijum dominantno-korišćenim poluprovodničkim materijalom.

1955. godine, *Jules Andrus* i *Walter Bond* u *Bell*-ovoj laboratoriji počeli su sa adaptacijom foto-litografskog postupka koji je razvijen za potrebe izrade štampanih ploča za ostvarivanje finijeg dizajna u silicijumu uz upotrebu sloja silicijum-dioksida. Po nanošenju foto-osjetljivog sloja ili "rezista" na vafer, upotrebom optičkih maski, definišu se precizne površine željenog oblika. Označene površine se "otvaraju" upotrebom odgovarajućih hemikalija i u daljem postupku u te otvore je moguće difundovati nečistoće odgovarajućeg tipa, formirajući na taj način zone p-tipa ili n-tipa u silicijumskoj podlozi.

Jedan od ranih pokušaja upotrebe foto-litografije u mikroelektronici učinili su *Jay Lathrop* i *James Nall* u laboratoriji vojske Sjedinjenih Država u Merilendu, dizajnirajući veoma tanke provodne linije širine oko 200 μm za povezivanje diskretnih tranzistora na keramičkoj podlozi. 1959. godine, *Lathrop* je prešao u *Texas Instruments* i radio za *Jack-a Kilby*-ja, dok je *Nall* kasnije radio za *Fairchild Semiconductor*.

Foto-litografija je ostala jedan od osnovnih koraka u proizvodnji poluprovodničkih komponenti danas.

U septembru 1955. godine, *William Shockley* i *Arnold Beckman* su se složili da *Shockley*-jevu Poluprovodničku laboratoriju učine odjeljkom *Beckman Instruments-a*. Novonastala kompanija okupila je tim veoma sposobnih inženjera i naučnika, među kojima su bili *Gordon Moore* i *Robert Noyce*, koji su sticali znanje, a potom i razvijali poluprovodničku tehnologiju i tehnike upravo radeći sa *Shockley*-jem. Iako je u decembru 1956. godine, *Shockley* podijelio Nobelovu nagradu za fiziku za otkriće tranzistora, njegovo osoblje je sve više uviđalo njegov izrazito nepravilan stil upravljanja. Takođe su postojala značajna neslaganja u daljim razvojnim

idejama i ciljevima kompanije. Poslije neuspješnog pokušaja da dobiju novog menadžera, osam *Shockley*-jevih zaposlenih među kojima *Moore* i *Noyce* napustili su kompaniju i osnovali *Fairchild Semiconductor Corporation* u *Palo Alto*-u. Njih su ubrzo slijedili mnoge kolege, od tehničara do doktora nauka. U toku naredne decenije, *Fairchild* je izrastao u jednu od najznačajnijih i najinovativnijih kompanija u poluprovodničkoj industriji. Upravo ova kompanija predstavlja tehnološku, a može se reći i kulturalnu, osnovu Silikonske Doline, dajući nekoliko novih kompanija visoke tehnologije među kojima *Advanced Micro Devices* (AMD) i *Intel*. *Shockley* je pokušavao još neko vrijeme da se bavi proizvodnjom, međutim karijeru je nastavio kao profesor na *Stanford* Univerzitetu. *Beckman* je 1960. godine prodao svoj dio kompanije *Clevite Corporation*-u.

U junu 1958. godine na konferenciji u Briselu, *Leo Esaki* je predstavio novu diodu koju je razvio za firmu *Sony*, kod koje struja opada sa porastom napona, dakle ponaša se kao negativna otpornost. *Esaki*-jeva ili tunel dioda, nazvana tako po tunel-efektu, nudila je veoma velike brzine rada sa malom potrošnjom snage. Iako je *Esaki* obeshrabrio mladog *Robert-a Noyce-a*, koji je došao do iste ideje i to zabilježio u avgustu 1956, predsjedavajući *William Shockley* je izuzetno pohvalio *Esaki*-jevo otkriće i "najavio" njegovu široku primjenu u računarima. 1973. godine *Esaki* je, tada kao član firme IBM, dobio Nobelovu nagradu za pionirski rad u oblasti tunelovanja elektrona u čvrstom stanju. U odnosu na početna očekivanja tunel dioda nije našla toliko široku primjenu. Kao diskretni element nije se mogla takmičiti sa integrisanim kolima u cijeni, pouzdanosti i posebno dimenzijama.

Kako su računarski sistemi postajali sve složeniji, inženjeri su pokušavali da nađu jednostavniji način za povezivanje hiljada tranzistora.

Nakon nekoliko pokušaja da se problem "tiranije brojeva" riješi, 12.-og septembra 1958. godine, *Jack Kilby* je u *Texas Instruments*-u projektovao kolo koje je sadržalo pnp tranzistor, ali i pasivne elemente - kondenzator i otpornik, od germanijuma. Upotrebom veoma tankih zlatnih niti i *flying-wires* tehnike povezao je elemente formirajući tako oscilator. Nedjelju dana kasnije predstavio je svoje kolo. TI je *Kilby*-ev koncept objavio u martu 1959. godine, dok je prvi komercijalni uređaj proizveden u martu 1960. godine - tip 502 binarni flip-flop po cijeni od 450 dolara za komad. Međutim, *flying-wires* tehnika ostvarivanja provodnih veza u sistemu nije riješila problem "tiranije brojeva", a bila je i veoma nepogodna za proizvodnju. U oktobru 1961. godine, pomenuta tehnologija je zamijenjena "potpuno" integrisanim kolima na bazi planarnog procesa.

Za potrebe vazduhoplovstva, 1958. godine, *Fairchild Semiconductor* je razvio silicijumski mesa tranzistor sa dvostrukom difuzijom.

Paralelno su radila dva tima: tim *Gordon-a Moore-a* na npn tranzistoru i tim *Jean-a Hoerni-a* na pnp tranzistoru. *Moore* je sa svojim timom bio brži, tako da se veoma brzo u proizvodnji pojavio 2N697. Međutim, isto toliko brzo, došao je do izražaja značajan nedostatak ovog kola. Naime, zbog potrebe za potpunom zaštitom kolektorskog pn spoja od spoljašnjih nečistoća, ovo kolo se pakovalo u metalni oklop što je značajno uticalo na pouzdanost ostvarivanja provodnih veza sa drugim komponentama.

Fizičar *Fairchild-a Jean Hoerni* je, u decembru 1957. godine, zabilježio svoju ideju koja se odnosila na novi proces kod koga bi sloj oksida štiti osjetljive pn spojeve ispod njega. Međutim, kompanija u tom trenutku nije imala razumijevanja za njegovu ideju, jer su bili preokupirani proizvodnjom svog prvog poluprovodničkog kola.

Hoerni je razvio novi proizvodni proces koji se zasnivao na svojstvu silicijum-dioksida da se može koristiti i kao maska i kao pasivni sloj. Kod mesa procesa oksidni sloj je služio kao maska da bi na kraju bio uklonjen. *Hoerni* je sloj oksida nanosio na samom početku procesa i koristio ga najprije kao masku za formiranje baze i emitora. Međutim, on je ostavio sloj oksida na površini vafera i po završetku proizvodnog postupka, što je bilo potpuno novo. Ovo je bilo protivno svim tada prihvaćenim stavovima - široko se vjerovalo da je sloj oksida koji se koristi za maskiranje nečistoća i da ga kao takvog treba ukloniti. *Hoerni* je, uprkos tome, ostavio sloj oksida na površini vafera i na taj način ostvario značajan rezultat - pasivizirao je kristalnu površinu i zaštitio pn spojeve tranzistora od spoljašnjih nečistoća.

Postupak koji je razvio *Hoerni* nazvan je planarni pristup zbog topografije finalnog dizajna. U januaru 1959. godine, zaštitio je kao patent svoje otkriće, dok je marta iste godine demonstrirao rezultate. Nedugo nakon toga, firma je prihvatila *Hoerni*-jev postupak i proizveden je prvi planarni tranzistor - 2N1613. Pokazalo se vremenom da planarni uređaji imaju i bolja električna svojstva - znatno manje struje curenja, na primjer. *Hoerni*-jev doprinos tehnologiji proizvodnje poluprovodničkih uređaja i danas se smatra izuzetno značajnim.

Razmišljajući o mogućnostima primjene *Hoerni*-jevog planarnog procesa, ko-osnivač *Fairchild*-a *Robert Noyce* je došao na ideju da se provodne veze među poluprovodničkim električnim komponentama mogu ostvari metalnim aluminijumskim linijama koje bi se nalazile iznad zaštitnog sloja silicijum dioksida. Na taj način kompletno električno kolo, nezavisno od njegove složenosti, moglo bi se nalaziti na jednom čipu. Eliminišući *flying-wires*, *Robert*-ova ideja bi vodila ka praktičnom metodu proizvodnje *Jack Kilby*-jevog "potpuno" poluprovodničkog kola.

Noyce je, 1959. godine, patentirao svoj izum i tim inženjera *Fairchild*-a je proizveo prvo monolitno integrisano kolo (IC - *Integrated Circuit*) u maju 1960. godine. Planarni metod je ostao osnova za proizvodnju integrisanih kola do danas.

Fairchild i *Texas Instruments* su vodili sudski spor oko ovog patenta godinama. Presuda je bila u korist *Robert*-a *Noyce*-a, međutim u to vrijeme dvije kompanije su već bile uspostavile sporazum koji je podrazumijevao isplatu *Fairchild*-u. *Kilby* i *Noyce* su dobili Nacionalnu Medalju za Nauku i danas se pominju kao ko-inventori integrisanog kola. *Kilby*-ju se pripisuje izgradnja prvog kola čije su sve komponente od poluprovodničkog materijala, dok se *Robert Noyce* pominje kao inženjer koji je uveo sloj metala preko oksida za ostvarivanje provodnih veza, što je vodilo do monolitnog integrisanog kola. *Noyce* je umro 1990. godine, tako da 2000. godine nije podijelio sa *Kilby*-jem Nobelovu nagradu, iako mnogi vjeruju da bi se to desilo da je bio živ.

1959. godine *John Atalla* i *Dawon Kahng* u *Bell*-ovoj laboratoriji projektovani su prvi tranzistor sa efektom polja (FET - *Field-Effect Transistor*) sa izolovanim gejtom. Obzirom na fizičku strukturu ovog tipa tranzistora: metal (gejt, M - *metal*), oksid (izolator, O - *oxide*), poluprovodnik (S - *semiconductor*), njegov puni naziv je MOSFET. 1964. godine, MOS tranzistori su se masovno pojavili na tržištu. Zbog svojih manjih dimenzija i manje potrošnje od bipolarnih komponenti, preko 90% mikro-čipova koji se danas proizvode koriste MOS tranzistore.

1963. godine, inženjeri *Fairchild*-a *C. T. Sah* i *Frank Wanlass* pokazali su da logička kola koja kombinuju p-kanalne i n-kanalne MOS tranzistore u komplementarno simetričnu

konfiguraciju ne troše "gotovo ništa" u *standby* modu. *Wanlass* je patentirao ideju koja se danas označava kao CMOS (*Complementary MOS*).

CMOS logika je najprije korišćena za potrebe vojnog vazduhoplovstva. Tako je *Radio Corporation of America* (RCA) 1965. godine proizvela prvi računar za Vazdušne snage SAD-a, baziran na CMOS logici. 1968. godine ista kompanija je demonstrirala 288-bitni statički RAM, kao i prva kola generalne namjene iz popularne familije CD4000. Na istoj logici zasnovan je i COSMAC 1802 mikroprocesor iz 1975. godine, koji je ugrađen u milione *Chrysler* automobila.

Jedna od prvih širokih primjena CMOS kola bila je kod uređaja koji su koristili bateriju za rad, kao na primjer, digitalni časovnici i portabilni instrumenti koji nisu imali izražene zahtjeve za velikim brzinama rada. Kada je 1978. godine *Hitachi* dizajnirao RAM visoke brzine pristupa, CMOS logika je postala ravnopravna, i po ostalim performansama, sa bipolarnom i konvencionalnom MOS logikom. Od tada, CMOS predstavlja idealno rješenje za integrisanje stotina hiljada tranzistora na jedan čip, uz minimalnu potrošnju.

Obzirom na činjenicu da je rezolucija analognih signala beskonačna, zahtjevi prema preciznosti analognih kola su značajno veći nego što je to slučaj kod digitalnih kola.

Prvo analognu kolo široke primjene bio je μ A702 operacioni pojačavač, koji je razvio tim inženjera *Fairchild*-a na čelu sa *David*-om *Talbert*-om i *Robert*-om *Wildar*-om, 1964. godine. Uslijedio je μ A709 operacioni pojačavač, koji je takođe masovno korišćen. *Talbert* i *Wildar* su kasnije prešli da rade za *Molectro*, gdje su počeli da razvijaju linearna kola iz serije LM, najprije LM101. 1968. godine, inženjer *Fairchild*-a *Dave Fullagar* je umetanjem kompenzacionog kondenzatora, LM101 unaprijedio u jedno od najpopularnijih integrisanih kola svih vremena - μ A741 operacioni pojačavač. Inženjeri *Analog Devices*-a su, na osnovu 741 arhitekture, dizajnirali svoj prvi visoko-precizni operacioni pojačavač 1971. godine. U ovom periodu intenzivno su se razvijala i proizvodila integrisana kola za najrazličitije potrebe.

Gordon Moore, kao jedan od direktora *Fairchild Semiconductor*-a, "povukao je liniju" kroz pet tačaka koje su predstavljale broj komponenti po integrisanom kolu koja su proizvedena u periodu 1959 - 1964. godina. Ukoliko bi se isti trend nastavio, *Moore* je zaključio da bi 1975. godine broj tranzistora na jednom čipu trebao dostići 65000, udvostručavajući se svakih 12 mjeseci. Njegov rad na ovu temu objavljen je u *Electronics*-u aprila 1965. godine.

Na *IEEE International Electron Devices* sastanku 1975. godine *Moore* je, tada kao predstavnik *Intel*-a, primijetio da je napredak u foto-litografiji, veličini vafera, tehnologiji procesa i samom dizajnu kola omogućio predviđenom trendu da bude realizovan, naročito kada su u pitanju poluprovodničke memorije. On je tada predvidio da će u oblasti razvoja mikroprocesora, trend razvoja izražen kroz povećanje broja tranzistora, biti nešto sporiji - udvostručavaće se svake dvije godine.

Ovo predviđanje je postalo neka vrsta izazova za brojne inženjere koji su radili u ovoj oblasti u narednom periodu. Analizirajući status poluprovodničke industrije 1995. godine, kada je broj tranzistora *Intel*-ovog *Pentium* mikroprocesora iznosio oko pet miliona, *Moore* je zaključio da "isti trend neće prestati uskoro".

Digitalni oblik podatka je mnogo pogodniji za obradu od analognog, zato je potrebno izvršiti konverziju analognog signala u digitalni. Integrisana kola koja sadrže i analogni i digitalni dio, odnosno, procesiraju i analogni i digitalni signal, označavaju se kao analogno-

digitalna integrisana kola. Značajan je broj pristupa rješenju problema konverzije analognog u digitalni i digitalnog u analogni signal, sa različitim ostvarenjima u pouzdanosti, brzini i cijeni.

George Erdi je 1968. godine, za *Fairchild*, dizajnirao jedno od prvih integrisanih kola koje je namijenjeno DA konverziji - $\mu A722$, 10-bitni strujni izvor. Sedamdesetih godina, svi veći proizvođači integrisanih kola, razvijali su familije uređaja koji su sadržali dio za konverziju podataka.

Upotrebom difuzionog otpornika inženjer PMI-a, *Dan Dooley*, je dizajnirao prvi potpuno integrisan DA konvertor, 6-bitni DAC01, 1961. godine. Uslijedili su 8-bitni Motorolin MC1408 i DAC08 PMI-a 1975. godine. Pouzdanost i rezolucija ovih AD konvertora zavisila je od pouzdanosti otpornika. *Peter Holloway* je za *Analog Devices*, 1976. godine, postigao dovoljnu preciznost otpornosti *thin-film* otpornika za 10-bitni DA konvertor - AD561. *Analog Devices* je razvio i 10-bitni AD konvertor AD571, 1978. godine.

Federico Faggin i *Tom Klein* su poboljšali pouzdanost, smanjili dimenzije pakovanja, i povećali brzinu MOS integrisanih kola uz pomoć svoje strukture silicijumskog gejta. *Faggin* je dizajnirao prvo integrisano kolo na bazi pomenute tehnike - *Fairchild*-ov 3708.

Robert Kerwin, *Donald Klein* i *John Sarace* u *Bell*-ovoj laboratoriji su značajno poboljšali performanse MOS tranzistora zamjenjujući aluminijumsku elektrodu gejta polikristalnim slojem silicijuma 1967. godine. *Boyd Watkins* je dao sličan predlog za *General Microelectronics* 1965. godine, ali je patent odlagan sve do 1969. godine.

Kao lider projekta, *Federico Faggin*, zajedno sa *Tom-om Klein-om*, radio je na komercijalizaciji tehnologije silicijumskog gejta koju su razvili članovi njegovog tima. U tom cilju, redizajnirao je p-kanalni, 8-bitni analogni multiplekser izrađen u tehnologiji metalnog gejta, uz pomoć nove tehnologije. Tako je *Fairchild*, 1968. godine, proizveo prvo integrisano kolo u tehnologiji silicijumskog gejta - 3708.

Intel je ovu tehnologiju počeo koristiti kao primarnu u proizvodnji poluprovodničkih memorija, jer je bilo moguće ostvariti 3-5 puta veću brzinu, uz potrošnju znatno manje površine. 1969. godine, *Intel* je realizovao svoj prvi komercijalni MOS uređaj 1101 256-bitni RAM. *Faggin* je prešao u *Intel* 1970. godine i ubrzo uspio da uz još neka poboljšanja dizajnira 4004 mikroprocesor CPU značajno manjih dimenzija.

Intel-ov pionirski rad u prelasku na tehnologiju silicijumskog gejta dao je kompaniji značajnu prednost i ubrzo je doveo do uvođenja dinamičkog RAM-a, a potom i razvoja i proizvodnje EPROM memorija.

U narednih pet godina MOS tehnologija silicijumskog gejta je postala industrijski standard za proizvodnju integrisanih kola i gotovo u potpunosti zamijenila bipolarnu tehnologiju (osim u oblasti aplikacija najvećih brzina).

Intel-ov 1103 DRAM predstavlja prvu ozbiljnu poluprovodničku "opasnost" po magnetne memorije koje su se koristile kao glavne memorije računara. Zaslužni za ovo ostvarenje su *Ted Hoff*, *Bob Abbott* i *Bob Reed*, koji su radili za *Intel*.

Radeći za *Intel*, *Dov Frohman* je tehnikom slobodnog gejta realizovao 2048-bitni 1702 EPROM. Brisanje je bilo moguće ostvariti izlaganjem memorije ultra-violetnim zracima. Ovaj tip memorije dugo se koristio kao programska memorija za mikrokontrolere i mikroprocesore.

Intel-ovi inženjeri, predvođeni *Federico-om Faggin-em*, implementirali su arhitekturni koncept *Ted-a Hoff-a*, u cilju realizacije prve centralne procesorske jedinice

(CPU) na jednom čipu. Ovaj tim koristio je MOS tehnologiju silicijumskog gejta da smjesti 2300 tranzistora četvero-bitne 4004 mikroprocesorske centralne jedinice (MPU) u 16-pinsko kućište.

Gary Boone i Michael Cochran su 1971. godine za Texas Instruments dizajnirali kalkulator na jednom čipu TMS1802 koji je predstavljao osnov za TMS1000 4-bitnu familiju mikrokontrolera generalne namjene iz 1974. godine. Ovo otkriće je uvelo elektroniku u svakodnevni život ljudi.

Prvi cjelokupan sistem na čipu predstavlja Microma-in digitalni časovnik sa LCD-om. Peter Stoll je 1974. godine integrisao LCD drajver kao i vremensku funkciju na jedan Intel-ov CMOS čip.

Istraživač IBM-a, Robert Dennard, je 1974. godine došao do izuzetnog zapažanja. Naime, on je primijetio da smanjivanje horizontalnih dimenzija tranzistora (dužine kanala) dovodi do povećanja njegove brzine rada u istoj razmjeri. U to vrijeme IBM-ova integrisana kola su koristila minimalnu dimenziju od 5 μm , da bi danas bilo moguće dimenzije smanjiti na svega nekoliko desetina nanometara.

John Birkner i H. T. Chua radeći za Monolithic Memories razvili su programabilne logičke nizove (PAL) jednostavne za upotrebu, kao i alate za brz razvoj i implementaciju korisničkih funkcija.

DSP na jednom čipu predstavlja MPU sa dodatnom mogućnošću izvršavanja složenih matematičkih operacija. Proizveden u Bell-ovoj laboratoriji, DSP-1 iz 1979. godine, je prvi DSP na jednom čipu.

3. ZAKLJUČAK

Na svom osnovnom nivou, integrisano kolo manipuliše karakteristikama elektriciteta. U stvari, cjelokupna elektronika se zasniva na manipulacijama tokom elektrona. Drugim riječima - potrebno je učiniti da elektricitet obavlja "napredne radnje". Veliki broj ljudi je uložio značajno vrijeme da "ukroti" elektricitet, od William-a Gilbert-a, koji je prvi upotrijebio riječ elektricitet prije oko 400 godina, do Thomas-a Edison-a koji je konstruisao prvi električni generator.

Otkriće vakumskih cijevi pokrenulo je elektronsku industriju. Često nazivane elektronskim cijevima, ovi uređaji su kontrolisali tok elektrona u vakumu. Inicijalno su korišćene da pojačaju signal za radio i druge audio uređaje. Postepeno su se počele koristiti veoma široko, da bi 1939. godine bile upotrijebljene kao prekidači u prvom računaru.

Krajem Drugog svjetskog rata bilo je jasno da cijena, dimenzije, kao i pouzdanost vakumskih cijevi ograničava njihovu komercijalizaciju i razvoj vojnih elektronskih sistema. Brodski razarač iz 1937. godine sadržao je svega 60 vakumskih cijevi. Čak B-29, kao jedno od naprednijih oružja u Drugom svjetskom ratu, sadržalo je oko 300 vakumskih cijevi.

Integracija je tada imala nizak prioritet. Međutim, elektronski sistemi su se ubrzano počeli usložnjavati. U poslijeratnom periodu - 1952. godine, najmoćniji razarač je brojao oko 3200 vakumskih cijevi. Naravno, i ENIAC iz 1946. je bio zasnovan na vakumskim cijevima. ENIAC je bio najbrži računar godinama, ali se sastojao od oko 18000 vakumskih cijevi.

Bilo je jasno da se sa vakumskim cijevima nije mogao ostvariti značajan razvoj u oblasti računara. Moglo se zaključiti da bi složeniji sistem zasnovan na vakumskim cijevima bio previše velikih dimenzija, previše težak, imao bi veoma veliku potrošnju i bilo bi suviše vruće nalaziti se u njegovoj blizini. A obzirom da je trebalo koristiti na hiljade individualnih komponenti, gotovo je nemoguće očekivati neophodnu pouzdanost sistema.

Sredinom pedesetih godina dvadesetog vijeka, naučnicima i inženjerima je to postalo jasno i mnogi su počeli razmišljati o rješenju ovog problema. Vojne aplikacije su igrale vodeću ulogu u razvoju elektronike. Bilo je potrebno što je moguće više smanjiti dimenzije sistema, kao i dizajnirati cjelokupan elektronski sistem.

Značajan iskorak ostvaren je u *Bell*-ovoj laboratoriji 1948. godine otkrićem tranzistora. Uvođenjem poluprovodničkih komponenti intenzivirana je trka minijaturizacije elektronskih uređaja.

Rad tranzistora se zasniva na gotovo slobodnom kretanju elektrona kroz kristalnu strukturu materijala poznatog kao poluprovodnik. Električna svojstva poluprovodnika mogu se mijenjati procesom dopiranja koji podrazumijeva pažljivo unošenje nečistoća u određene oblasti poluprovodnika. Neke nečistoće povećavaju broj slobodnih elektrona u poluprovodniku, dok neke "uzimaju" elektrone, formirajući šupljine. U oba slučaja povećavaju se provodna svojstva poluprovodnika. Poluprovodnički materijal čiji su većinski nosioci naelektrisanja elektroni označava se kao poluprovodnik n-tipa, dok se poluprovodnik čije se provođenje zasniva na šupljinama označava kao poluprovodnik p-tipa. U osnovi, tranzistor se sastoji od tri sloja poluprovodnika raspoređenih kao pnp ili npn struktura i smještenih u keramičko kućište.

Prvi tranzistor je poznat kao *point-contact* tranzistor, sa današnjeg stanovišta izgleda veoma primitivno, ali je bio osnova za dalji razvoj u ovoj oblasti. Kasnije se tranzistor proizvodio od jedinstvenog kristala germanijuma koji je dopiran nečistoćama odgovarajućeg tipa u određenim oblastima. Dalji razvoj uvodi proces difuzije, legure, površinske barijere i planarni postupak.

Prvi tranzistori su realizovani od germanijuma. Međutim, silicijum ima bolja svojstva u smislu šireg opsega radnih temperatura, probojnog napona itd. Problem je bio u tome što je silicijum bilo teže "obrađivati" zbog više tačke topljenja. Silicijumski tranzistori su pedesetih godina dvadesetog vijeka počeli da se proizvode.

1958. godine, *Jack Kilby* je odlučio da traži novi posao. U *Centralab*-u, kompaniji za koju je *Kilby* radio, su proizveli redukcionu peć i ovladali tehnikom "rasta kristala", proizveli leguru germanijuma... Oni su takođe uveli plastično kućište za tranzistor. Međutim bilo je jasno da je potrebno uvesti potpuno novi koncept u proizvodnju elektronskih uređaja, kako bi se moglo odgovoriti na zahtjeve tržišta, pogotovo vojne industrije.

Texas Instruments je imao najviše razumijevanja za *Kilby*-jeve ideje i ponudio mu posao u oblasti minijaturizacije elektronskih kola. Počeo je da radi za TI u maju 1958. godine. Obzirom da je bio novi radnik, nije išao na godišnji odmor. Upravo tog ljeta nastalo je prvo integrisano kolo. *Kilby* je došao na ideju da komponente koje je već proizvodio TI - tranzistore, kondenzatore i otpornike realizuje od poluprovodničkog materijala, što je bilo u suprotnosti sa trendovima tog perioda. Naime, u to vrijeme generalni pristup je podrazumijevao fabrikaciju pojedinih komponenti u različitim tehnologijama i upotrebom različitih materijala. *Kilby*-jeva ideja je bila da "sve pojednostavi", na pomenuti način.

Realizujući sve komponente kola od istog komada poluprovodnika i uspostavljajući veze među njima na odgovarajući način, kompletno kolo bi imalo značajno manje dimenzije.

24. jula 1958. *Kilby* je u radnoj svesci zabilježio svoju ideju poznatu kao *The Monolithic Idea*. Upravo je to bio nacrt prvog integrisanog kola.

Prvo kolo koje je proizvedeno u integrisanoj tehnologiji bio je oscilator sa faznim pomakom. Realizovan je 12. septembra 1958. godine i frekvencija oscilovanja mu je bila oko 1.3 MHz. Prvo integrisano digitalno kolo bio je flip-flop koji je TI proizveo početkom 1959. godine.

U istom periodu *Robert Noyce* iz *Fairchild*-a je radio na svom integrisanom kolu i ukazao na povoljnost upotrebe planarnog procesa i metalnih provodnika preko sloja oksida. *Noyce* se smatra ko-inventorom integrisanog kola.

Iako danas izgleda gotovo nemoguće, ideja integrisanog kola je u to vrijeme pretrpjela značajne kritike. Jedna od primjedbi bila je nizak profit. Naime, svega 10% kola proizvedenih u poluprovodniku je ispravno radilo. Drugi su kao primjedbu isticali činjenicu da se komponente najboljih karakteristika ne proizvode od silicijuma. Međutim, osnovni razlog negodovanja tadašnjih proizvođača elektronskih komponenti prema integrisanim kolima, bila je bojazan da će ostati bez posla.

Prekretnicu u generalnom stavu prema novoj eri u elektronici učinila su dva jaka vojna programa šezdesetih godina - *Apollo* misija na Mjesec i *Minuteman* projektil. Prihvatanje integrisane tehnologije od strane pomenutih programa predstavljalo je značajnu podršku razvoju ove oblasti.

Od 1964. godine, nekoliko kompanija počelo je intenzivno da koristi integrisanu tehnologiju. *Kilby* je, kao član tima TI-a, razvio prvi ručni elektronski kalkulator.

Razvoj elektronike u periodu koji je uslijedio nakon otkrića integrisanog kola je bio izuzetno brz i značajan. Razvijani su novi i napredniji tehnološki procesi proizvodnje, sofisticirane tehnike za dizajn uz pomoć softvera. Prvi čip sa svega nekoliko komponenti, veoma brzo je prerastao u kolo sa 10000 komponenti sedamdesetih godina i nekoliko stotina miliona komponenti danas. Naravno, ovako brz razvoj pratio je i konstantan pad cijena. 1958. godine jedan tranzistor je koštao oko 10\$, dok se danas čip koji sadrži preko 100 miliona tranzistora može kupiti za istu cijenu. Ovakav pad cijene (sa 100 miliona na jedan) za relativno kratko vrijeme, značajno je uticao na razvoj elektronike zadnjih decenija.

Iako su integrisana kola razvijena za vojne aplikacije, danas se široko koriste u svakodnevnom životu. Automobili su bezbjedniji i manje zagađuju okolinu zahvaljujući integrisanim sistemima, radio i TV prijemnici kao i mnogi drugi elektronski uređaji su dostupni gotovo svima, razvoj raznih komunikacionih sistema se bazira na integrisanim kolima.

2000. godine oko 1000 elektrona je bilo potrebno da "uključi" odnosno "isključi" jedan tranzistor, dok je danas težnja da se taj broj svede na svega jedan elektron. To fizičko ograničenje upućuje naučnike na revolucionarno novi koncept i "molekularnu" elektroniku.

(na osnovu predavanja *Jack-a Kilby*-a na dodjeli Nobelove nagrade za fiziku, 08.12.2000, [10])

LITERATURA

- [1] Grant McFarland, "Microprocessor design: a practical guide from design planning to manufacturing", *McGraw-Hill Professional*, 2006
- [2] Michael Riordan, "How physicist Jean Hoerni built the bridge from the transistor to the integrated circuit", *IEEE Spectrum*, December 2007, pp. 44-50
- [3] Young, Ian. "A History of the Continuously Innovative Analog Integrated Circuit", *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, October 2007
- [4] Michael J. Riezenman, "IEEE Milestone Honors Invention Of Planar Process, Integrated Circuit", 2009
- [5] Thomas H. Lee, "The (Pre-) History of the Integrated Circuit: A Random Walk", *IEEE Solid-State Circuits*, April 2009
- [6] Jack S. Kilby, "Turning Potential into Realities: The Invention of Integrated Circuit", *Nobel Lecture*, December 2008
- [7] Samuel K. Moore, "Fairchild Turns 50", *IEEE Spectrum*, October 2007
- [8] Michael Riordan, "The Men Who Made the Microchip", *IEEE Spectrum*, April 2006
- [9] Michael Riordan, "How Bell Labs Missed the Microchip", *IEEE Spectrum*, December 2006
- [10] www.nobelprize.org
- [11] www.computerhistory.org
- [12] www.icknowledge.org