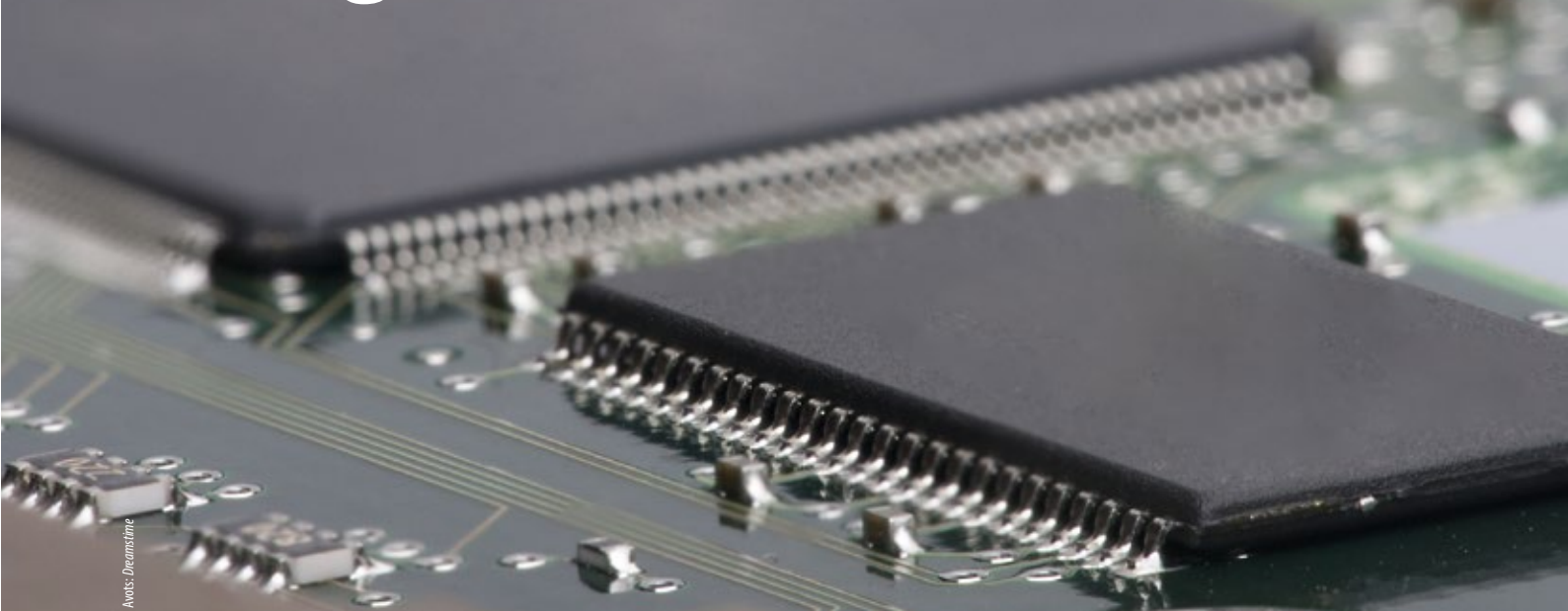


No silīcija diodes līdz integrālām shēmām



Kurts Švarcs

Šogad apīt 70 gadi, kopš tika izgudrots tranzistors, un nākamgad pasaule atzīmēs 60 gadus, kopš tika izgudrotas integrālās shēmas (“čips”). Šie atklājumi izraisīja revolūciju elektronikā un datortehnikā, un to rezultātā tika radīts gan tranzistora radiouztvērējs, gan portatīvais kalkulators, gan *iPhone* mobilais tālrunis un daudz kas cits. Mūsdienu tehnisko laikmetu var raksturot ar Alberta Einšteina vārdiem: “Progress šodien ir tik straujš, ka viena cilvēka apgalvojumam par problēmas risinājuma neiespējamību cits piebilst, ka tā jau atrisināta.”

Trīspadsmitā gadsimta filozofs un dabaszinātnieks Rodžers Bēkons (*Roger Bacon*, 1214–1294) tālredzīgi apgalvoja: “Zinātne ir vara.” Šo Bēkona aforismu laika gaitā atkārtoja un pārfrāzēja desmitiem izcilu domātāju, un to apstiprina zinātnes un tehnikas progress no viduslaikiem līdz šodienai. Īpaši bagāts ar atklājumiem un izgudrojumiem ir bijis 20. gadsimts: Einšteina relativitātes teorija, kvantu mehānika, urāna kodoldalīšanās reakcijas, kodolieroči, tranzistors un daudz kas cits. Lai šos izgudrojumus realizētu, būtiski svarīgi bija izstrādāt jaunu, iepriekš nezināmu tehnoloģiju. Diemžēl daudzu ģeniālo izgudrotāju vārdi plašākai publikai ir sveši. Reti kurš dzelzceļa pasažieris šodien iedomāsies, ka pirmo darbojošos tvaika lokomotīvi 1814. gadā uzbūvēja angļu inženieris Džordžs Stīvensons (1781–1848). Arī daudzi *iPhone* mobilā tālruņa īpašnieki nez vai zina, ka šāds universāls dators ar fotokameru kļuva iespējams, tikai pateicoties tranzistoriem un integrālām shēmām, kurus izgudroja attiecīgi 1948. un 1959. gadā. Šajā rakstā ir aplūkots abu atklājumu grūtais un nejausību pilnais ceļš.

Neparastie materiāli

Elektronikas uzplaukuma laiks ir 20. gadsimts, tomēr pirmie atklājumi šajā jomā, tai skaitā saistībā ar svarīgāko pusvadītāju materiālu silīciju, tika veikti jau agrāk. Viens no radiotehnikas pionieriem – Nobela prēmijas laureāts (1909) **Karls Ferdinands Brauns** (*Karl Ferdinand Braun*, 1850–1918), eksperimentējot ar sēru saturošiem minerāliem (viņš tos nosauca par *Schwefelmetalle* – “sēra metāliem”), 1874. gadā atklāja elektriskās strāvas taisngrieža efektu, kas izpaužas elektriskās pretestības atkarībā no sprieguma polaritātes, kas nosaka strāvas virzienu. Eksperimenta rezultātus Brauns publicēja tā laika vadošā zinātniskā žurnālā [1]. Izskaidrot šo efektu varēja tikai ar kvantu mehānikas likumiem divdesmitā gadsimta otrajā pusē. Brauna nopelni ir arī atklājumi vakuumtehnikas jomā (vadāms katodstaru (elektronu) kinoskops) un jutīgas radiatoraīdētāju shēmas izstrāde, par ko 1909. gadā viņš saņēma Nobela prēmiju fizikā (kopā ar itāliešu fiziķi un radioinženieri Guljelmo Markoni). Tā pēc kārtas bija

devītā Nobela prēmija saistībā ar nopelniem bezdrāts radio un telegrāfa sakaru jomā. Brauns un Markoni bija aktīvi, autoritatīvi zinātnieki, taču viņi darbojās samērā izolēti no fundamentālo pētījumu autoriem. Brauns bija Prūsijas Zinātņu akadēmijas loceklis, taču viņam nebija personisku kontaktu ar šīs akadēmijas vadošajiem zinātniekiem Maksu Planku un Albertu Einšteinu – šis apstāklis ilustrē 20. gadsimtam raksturīgo specifiskāciju un arī neiespējamību aptvert visus zinātnes un tehnikas sasniegumus kopumā.

Otrs radiotehnikas pionieris – amerikāņu inženieris **Grinlifs V. Pikards** (*Greenleaf Whittier Pickard*, 1877–1956) 20. gadsimta sākumā saņēma ASV patentu par silīcija detektoru, kuru viņš izmantoja radiouztvērējos. Tā būtībā bija silīcija diode, kuras darbības principi tika izskaidroti daudz vēlāk (tab., 1. att.). Tajā pašā laikā amerikāņu inženieris **Lī De Forests** (*Lee de Forest*, 1873–1961) patentēja pirmo radiolampu signālu pastiprināšanai – triodi, kurai bija izšķiroša loma radiotehnikas attīstībā. Savā radošajā mūžā de Forests saņēma vairāk nekā trīssimt patentus. Tehniskā progresa pavadoni – cīņu par patentiem populārais autoindustrijas pionieris Henrijs Fords (1863–1947) raksturoja ar vārdiem: “Ne izgudrojumi, bet to uzlabojumi rada bagātības.” Šī patiesība ir aktuāla līdz pat šodienai.

Abi pasaules kari sekmēja radiosakaru attīstību, pētniekiem apgūstot radioviļņu diapazonus no garajiem radioviļņiem (ar kilometros mērāmu viļņa garumu) līdz milimetru īsiem viļņiem radiolokācijā. Jau pirmās televīzijas pārraides (attēls un skaņa) izvirzīja jaunas prasības pārraides tehnikai. Otrā pasaules kara radara tehnika (radiolokācija) parādīja tā brīža tehnoloģisko ierīču, tostarp radiolampas, trūkumus. Radiotehnika prasīja jaunas radošas izmaiņas.

Tranzistors un apvērsums elektronikā

Bella laboratorijām (*Bell Laboratories jeb Bell Labs*, iepriekš *AT & T Bell Laboratories*) – ASV korporācijai un lielākajam pētniecības centram telekomunikāciju, elektronisko un datorsistēmu jomā – ir bijusi izšķiroša loma pusvadītāju elektronikā attīstībā. Jau pagājušā gadsimta 30. gados *Bell Labs* organizēja pusvadītāju laboratoriju, lai radītu nākotnes elektroniku, aizvietojojt vakuuma radiolampas. Tas notika laikā, kad pusvadītāju materiāli vēl nebija pazīstami un neviens nevarēja pateikt, vai šāds mērķis vispār ir sasniedzams. 1936. gadā Bella laboratorijā sāka strādāt jauns zinātņu doktors **Viljams Šoklijs** (*William Bradford Shockley*, 1910–1981), vēlākais Nobela prēmijas laureāts. Jau pēc trim gadiem, 1939. gada 29. decembrī, Šoklijs laboratorijas protokolu grāmatā ierakstīja pravietiskos vārdus: “Šodien es sapratu, ka principā iespējams pusvadītāju pastiprinātājs vakuuma radiolampas vietā.” Viņš arī pats aktīvi piedalījās sava pareģojuma īstenošanā.

Pusvadītāju materiāli ar elektrisko vadītspēju starp metāliem un izolatoriem bija pazīstami jau deviņpadsmitajā gadsimtā. Amerikāņu inženieris G. Pikards jau 1906. gadā saņēma patentu par silīcija detektoru, ko izmantoja pirmajos vienkāršajos radiouztvērējos (tab.). Tomēr šāda detektora darbības princips bija neskaidrs līdz pusvadītāju kvantu teorijas izstrādei pagājušā gadsimta vidū. Pusvadītāju pirmie pielietojumi tika veikti bez izpratnes par mehānismu

Tabula. Tranzistora izgudrojuma vēsture – no Si detektora līdz integrālām shēmām

Gads	Atklājums	Autors
1874	Taisngrieža efekts pusvadītāju materiālos (izskaidrojums 20. gadsimtā) 1909. gadā Nobela prēmija fizikā kopā ar G. Markoni “Par ieguldījumu bezvadu telegrāfa attīstībā”	Karls Ferdinands Brauns (1850–1918)
1906	Silīcija detektors (Si) radiouztvērējiem – ASV patents US 836 531	Grinlifs V. Pikards (1877–1956)
1906	Vakuuma triode (<i>Audion</i>) – patents US 841 387 1907. gadā patents amplitūdas modulācijai US 879532A	Lī de Forests (1873–1961)
1925	Elektriskās strāvas kontroles sistēma – Kanādas patents 272437 Tranzistora darbības princips (bez eksperimenta)	Julius E. Lilienfelds (1882–1963)
1948	<i>Bell Laboratories</i> – pirmais darbojošais germānija (Ge) bipolārais tranzistors Patents US 2 569 347 1956. gadā Nobela prēmija fizikā “Par pusvadītāju pētījumiem un tranzistora efekta atklāšanu”	Džons Bardīns (1908–1991), Volters Brateins (1902–1987), Viljams Šoklijs (1910–1981)
1948	Bipolārā tranzistora teorija [1, 2]	Viljams Šoklijs
1948	Germānija (Ge) punkta kontakta tranzistors – Francijas patents FR1010427 <i>Westinghouse Freins</i> pārtrauca ražošanu 1952. gadā, jo nespēja konkurēt ar ASV firmām	Herberts Matare (1912–2011) Heinrihs Velkers (1912–1981)
1958	Germānija integrālā shēma (<i>Texas Instruments</i>) 1959. gadā – patents US 3138743A (daudzelementu formēšana kristālā) Ražošana uzsākta 1959. gadā 1967. gadā – kalkulatora izgudrojums 2000. gadā – Nobela prēmija “Par integrālo shēmu izgudrojumu”	Džeks Kilbijs (1923–2005)
1961	Silīcija integrālā shēma ar plakano tehnoloģiju (<i>Fairchild Semiconductor</i>) Divi ASV patenti: US 2 981 366 (komponentu savienojumi); US 3 150 299 (p-n pāreju izolācija)	Roberts Noiss (1927–1991)

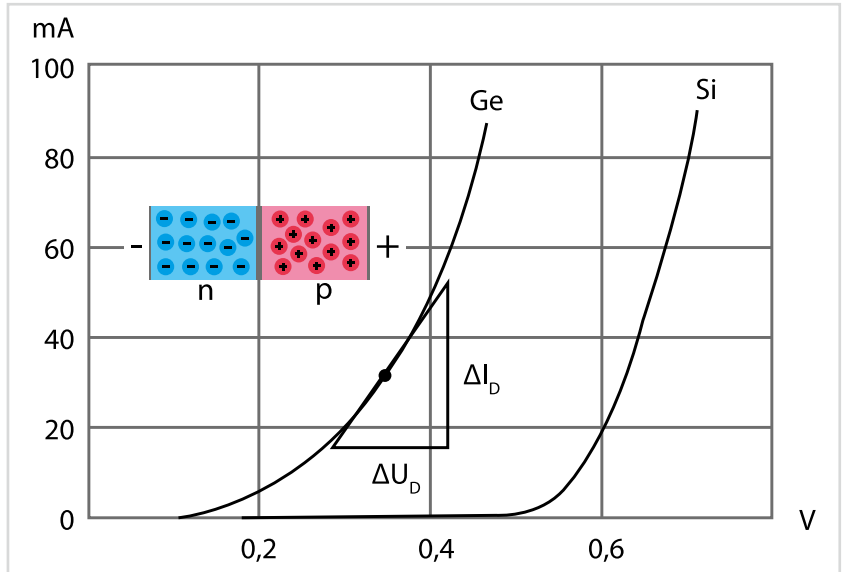
būtību, un to attīstība nebija iespējama bez kvantu fizikas. Tomēr, par spīti teorijas trūkumam, domājošiem fiziķiem bija skaidrs, ka vakuuma lampas var aizvietot tikai ar pusvadītājiem ar viduvēju elektrisko vadītspēju: metālos ar lielu elektronu koncentrāciju pastiprināšana nav realizējama un izolatoros (dielektriskos materiālos) nav brīvo lādiņu nesēju. Šis apstāklis arī bija pamats austriešu izcelsmes fiziķa

Juliusa Lilienfelda (*Julius Edgar Lilienfeld*, 1882–1963) patentam (1925) par cietvielas triselektrodu pastiprinātāju – tranzistora prototipu, kaut arī tas tika veikts bez fizikālo procesu izpratnes. Lilienfelda patents teorētiski aprakstīja signālu pastiprināšanas iespēju, ko pats tā autors nekad nerealizēja. Šo patentu pieminam tāpēc, ka tas daļēji ierosināja Šoklija grupas pētījumus.

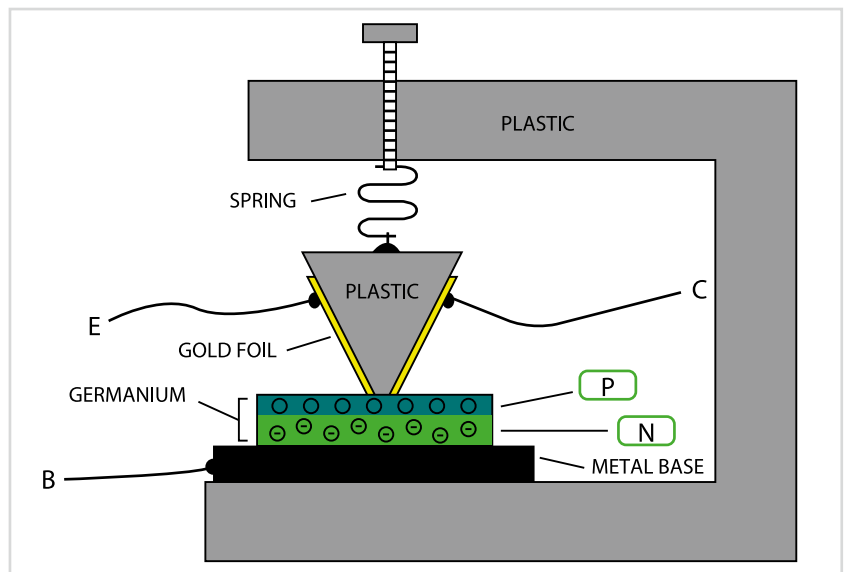
Otrais pasaules karš aizkavēja pusvadītāju pētījumus Bella laboratorijās, kuru resursi tika koncentrēti radara tehnikas pilnveidei. Viljams Šoklijs vairākus gadus piedalījās Manhetenas atombumbas projektā un atgriezās *Bell Labs* pusvadītāju laboratorijā tikai 1945. gadā. Lai paātrinātu pusvadītāju elektronikas attīstību, Šoklijs pētījumus koncentrēja uz diviem pusvadītāju materiāliem – germāniju (Ge) un silīciju (Si). Vairākus gadus Šoklija grupa strādāja ar tūriem nedotētiem pusvadītājiem, kuriem piemita elektronu vadītspēja. Ilgstošie eksperimenti neveda nekādu pastiprinājumu. Grupas teorētiskais **Džons Bardins** (*John Bardeen*, 1908–1991), vēlāk divkārtējs Nobela prēmijas laureāts!) to izskaidroja ar virsmas lādiņiem pusvadītājos, kuri ekranē ārējo elektrisko lauku. 1947. gadā **Volters Brateins** (*Walter Houser Brattain*, 1902–1987) kopā ar Bardinu uzsāka jaunus eksperimentus ar divslāņu germānija kārtiņām uz metāla pamatnes un trim elektrodēm (viens no metāla pamatnes un divi uz germānija virsmas, 2. att.). 1947. gada 23. decembrī Brateins ieguva piecpadsmkārtīgu pastiprinājumu, izmantojot n-tipa un p-tipa germānija kārtiņas. Viljams Šoklijs tobrīd bija atvaļinājumā, un šis eksperiments tika veikts bez viņa līdzdalības.

Atgriezies laboratorijā, Šoklijs bija pārsteigts par rezultātiem. Viņš nojauta, ka tranzistora darbība pamatojas uz p-n pāreju starp pusvadītāju slāņiem ar dažādu elektronu (n) vai caurumu (p) vadītspēju, ko tobrīd neizprata neviens. Tai pašā dienā Šoklijs ķērās pie darba un nedēļas laikā izstrādāja p-n pāreju teoriju, atklājot jaunu ēru pusvadītāju fizikā [2]. Pirmie eksperimenti *Bell Labs* to apstiprināja jau 1948. gadā. Šoklijs pirmais izprata bipolārā tranzistora darbību un 1950. gadā publicēja monogrāfiju, kas daudzus gadus bija svarīgākā mācību grāmata pusvadītāju

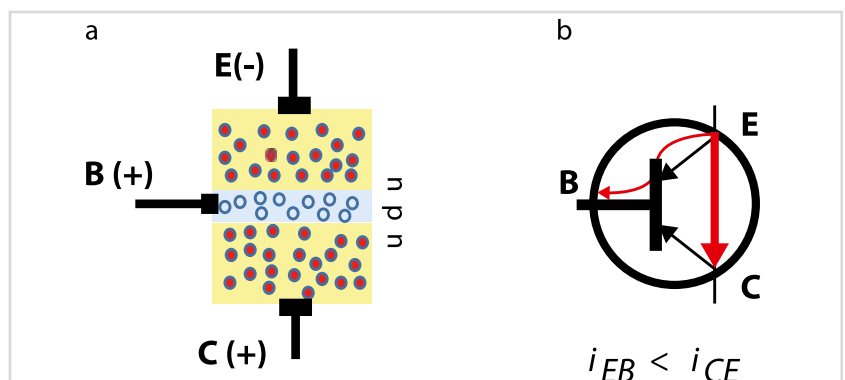
3. attēls. a – Bipolārais tranzistors (*nnp*) sastāv no divām n-tipa pusvadītāju kārtiņām ar elektronu (sarkanie aplī) vadītspēju, starp kurām ir plāns p-tipa slānis ar cauruma vadītspēju (tukšie aplī). b – Spriegums V_{EB} izraisa elektronu plūsmu caur n-p pāreju no emitera (E) uz bāzi (B) un stimulē elektronu plūsmu (strāva i_{EB}) uz nākamo n-pusvadītāja kārtiņu. Sprieguma V_{BC} iespaidā ($V_{BC} < V_{EB}$) strāva (sarkanās līnijas) no B uz C (i_{BC}) ķēdē pastiprinās ($i_{BC} > i_{EB}$)

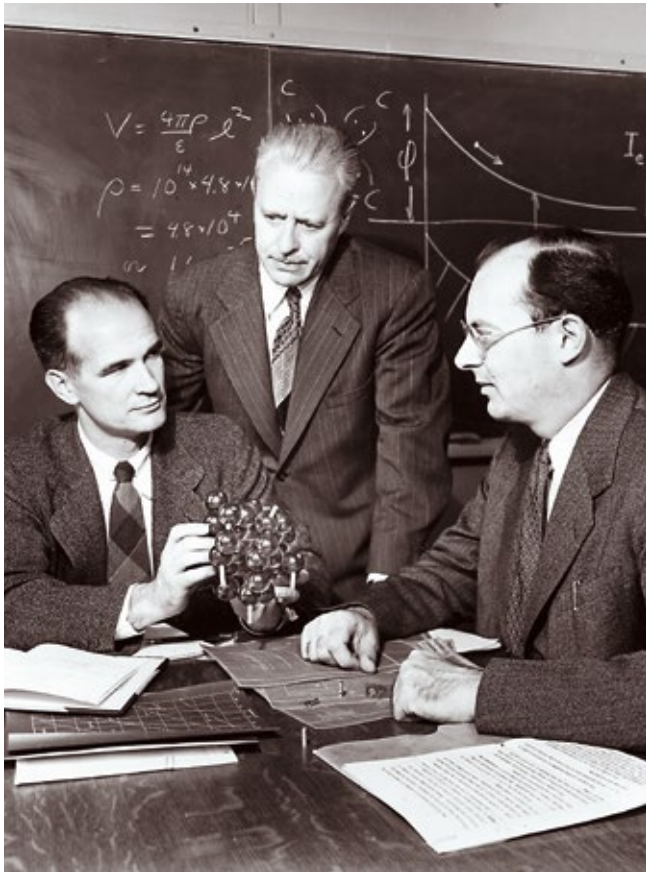


1. attēls. n-p pāreja ir robežslānis (ap mikrona desmitdaļu) starp pusvadītājiem ar dažādu vadītspēju (negatīvu, elektronu, n un pozitīvu, caurumu, p). Robežslānis (barjera) nosaka nesimetrisku strāvas vadītspēju (lādiņu nesēji var pārvietoties tikai vienā virzienā). Attēlā parādīta strāvas atkarība no sprieguma germānija (Ge) un silīcija (Si) taisngriežos (diodē)



2. attēls. Voltera Brateina tranzistors bija "juveliera" meistaradarbs: uz polimēra prizmas bija uzputināti zelta (Au) elektrodu (*gold foil*) ar kontaktiem E un C uz p-tipa Ge kārtiņas (attālumā ap 50 μm). Zem p-tipa kārtiņas bija n-tipa Ge kārtiņa (*Germanium*) kontaktā ar metāla pamatni (*metal base* ar kontaktu B). Neliels spriegums starp E un B (V_{EB}) izraisīja strāvas pastiprinājumu ķēdē starp elektrodēm B (bāze) un C (kolektors)





Aveis: Wikimedia Commons

4. attēls. Viljams Šoklijs (no kreisās), Volters Brateins un Džons Bardins Bella laboratorijā 1948. gadā

fizikā un elektronikā. Džona Bardina, Voltera Brateina un Viljama Šoklija pētījumi 1956. gadā vainagojās ar Nobela prēmiju.

Neatkarīgi no *Bell Labs* grupas sistemātiskiem pētījumiem vācu fiziķi **Herberts Matare** (*Herbert Franz Mataré*,

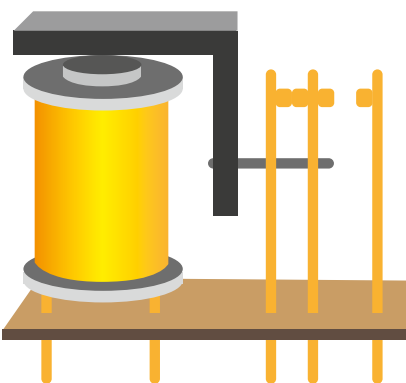


1912–2011) un **Heinrihs Velkers** (*Heinrich Johann Welker*, 1912–1981) uzņēmumā *Westinghouse Freins* Francijā izstrādāja un 1948. gadā patentēja germānija tranzistoru un pat uzsāka tā ražošanu. Tomēr šis izgudrojums pēckara Eiropā nevarēja konkurēt ar amerikāņu produkciju.

Vienkāršots bipolārā tranzistora darbības princips parādīts 3. attēlā. Tranzistors sastāv no trim pusvadītāju kārtiņām ar dažādu vadītspēju (nnp): (1) Ge kārtiņa ar elektronu vadītspēju (emitors, E); (2) ļoti plāna kārtiņa ar caurumu vadītspēju (bāze, B); (3) Ge kārtiņa ar elektronu vadītspēju. Spriegums starp EB (V_{EB}) ir zemāks nekā V_{EC} ($V_{EB} < V_{EC}$). Nelielas sprieguma V_{EB} izmaiņas izraisa lielas strāvas izmaiņas bāzes (B) un kolektora (C) ķēdē (BC). Tranzistorā plānā p-tipa kārtiņa starp abām n-tipa kārtiņām (3. att.) darbojas līdzīgi kā trešais elektrods starp katodu un anodu vakuuma triodē.

Pirmie sērijveida tranzistori tika ražoti jau 1953. gadā. Ne daudz vēlāk tranzistoros germāniju aizvietoja ar silīciju. Sākās jauns posms pusvadītāju elektronikā. Radās jaunas firmas, kas uzlaboja tranzistoru tehnoloģiju (*Texas Instruments*, *Fairchild Semiconductor*, *Intel Corporation* u.c.). Sāka darboties Henrija Forda formulētais princips un patentu karš (plašāk sk. [4]). Mūsdienās pasaulē tiek saražots ap 60 mljrd. tranzistoru gadā, aizvietojot vakuuma radiolampas visos pielietojumos, ieskaitot augstsprieguma (līdz tūkstoš voltiem) un stiprās strāvas (desmitiem ampēru un vairāk) tehnikā (5. att.).

Integrālās shēmas un digitālā revolūcija

Tranzistori aptvēra visas elektronikas nozares un pavēra jaunas iespējas raķešu un satelītu vadības sistēmu attīstībai. Tranzistori tika izmantoti arī datoros, kur vakuuma radiolampas demonstrēja savus principiālos trūkumus – milzīgo izmēru, siltuma efektus (termiskā elektronu emisija) un lēno darbību (ierobežojumi augstām frekvencēm). Pirmo datoru TRADIC ar desmittūkstoš germānija diodēm un ap

<p>a</p>  <p>$\tau \approx 50 \text{ ms}$ $5 \times 10^{-2} \text{ S}$</p>	<p>b</p>  <p>$\tau \approx 1 \mu\text{s}$ 10^{-6} S</p>	<p>c</p>  <p>$\tau \approx 0,01 \text{ ns}$ 10^{-11} S</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

5. attēls. Elektriskā un elektroniskā pārslēgšana: a – indukcijas relejs, kuru izgudroja amerikāņu fiziķis Džozefs Henrijs (*Joseph Henry*, 1797 – 1878) un kuru līdz 20. gadsimtam izmantoja telegrāfa un telefona sakaros; b – radiolampu izmantošana deva iespēju palielināt pārslēgšanas ātrumu līdz augstām frekvencēm (MHz) un realizēt pārslēgšanu mikrosekundē; c – tranzistoru ātrdarbība pavēra jaunu ēru informācijas apstrādē līdz 100 GHz ar elementāro pārslēgšanas laiku 0,01 ns (1 ns ir miljardā daļa sekundes)

septiņsimt tranzistoriem 1954. gadā izstrādāja Bella telefonu kompānija. TRADIC dators bija daudz labāks par vakuuma lampu datoru, tomēr demonstrēja grūtības izmantot tranzistorus liela mēroga datoros, kuros informācijas apstrāde notiek nanosekundēs ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) un atmiņa aptver tūkstošiem gigabaitu ($1 \text{ GB} = 10^9 \text{ B}$). Bija nepieciešama jauna elektronika ar atsevišķu elementu – diožu, tranzistoru u.c integrāciju.

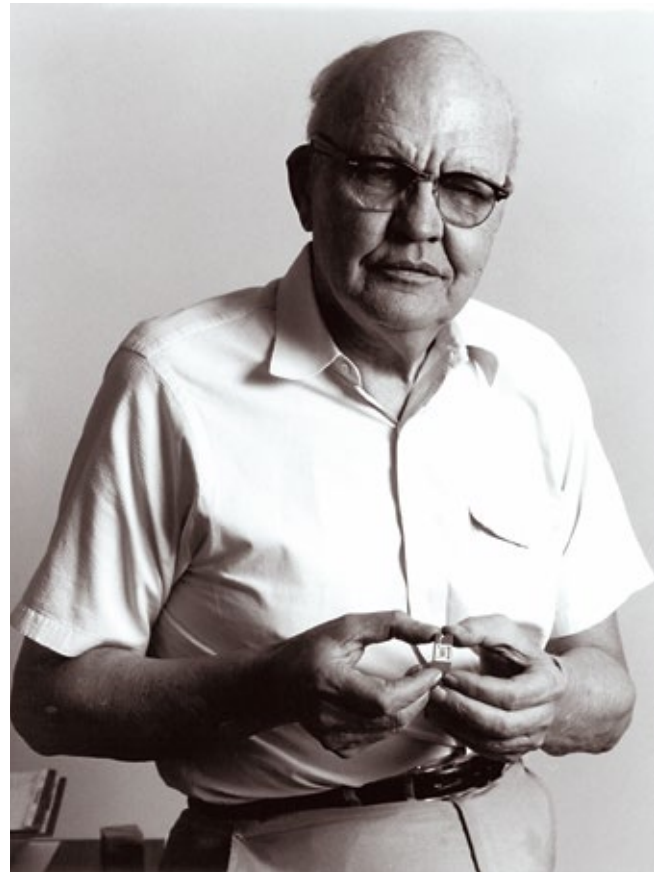
Šo integrālo shēmu jeb “čipu” ēru atklāja un realizēja amerikāņu fiziķis un izgudrotājs **Džeks Kilbijs** (*Jack St. Clair Kilby*, 1923–2005). Viņš uzskatīja, ka modernajai elektronikai ir nepieciešamas kompleksas shēmas ar daudziem elementiem vienā sistēmā (integrālā shēma (IS) jeb čips). 1958. gada vasarā Kilbijs sāka strādāt firmā *Texas Instruments*, un kā jaunam līdzstrādniekam viņam nebija atvaļinājuma. Vienatnē strādājot laboratorijā, Kilbijs jau 1958. gada 12. septembrī demonstrēja pirmo darbojošos integrālo shēmu (IS) uz 1,6 mm x 9,5 mm pamatnes ar vairākiem germānija tranzistoriem un diodēm. No šodienas skatpunkta raugoties, shēma bija primitīva, tomēr tā darbojās. 1959. gada 6. februārī Kilbijs iesniedza pieteikumu patenta saņemšanai. Nav pārsteidzoši, ka Kilbija izgudrojumu pirmie klienti bija ASV Gaisa spēki.

Lai gan Kilbija izstrādātās integrālās shēmas demonstrēja tehnisku progresu, tām bija nepieciešama pilnveide. Integrālo shēmu attīstībā izšķiroša loma bija ražošanas tehnoloģijai. Viens no ierobežojumiem bija integrālās shēmas materiāls – germānijs. Apmēram sešus mēnešus pēc Kilbija IS patenta amerikāņu fiziķis un inženieris **Roberts Noiss** (*Robert Norton Noyce*, 1927 – 1990) uzņēmumā *Fairchild Semiconductor* izstrādāja silīcija integrālo shēmu, ko patentēja 1961. gadā. Silīcijam ir labākas pusvadītāju īpašības, un tas kļuva par dominējošo materiālu šajā jomā.

Vienlaikus *Fairchild Semiconductor* izstrādāja jaunu plakanas integrālās shēmas tehnoloģiju, kas palielināja ražošanas jaudu. Būtisks faktors bija mikroshēmu izmantošana *Apollo* kosmiskās programmas satelītu vadības un datoru sistēmā. Tas bija pirmais plašais mikroshēmu pielietojums satelītu tehnikā.

Jaunā IS tehnika pavēra iespējas radīt “loģiskas” elektroniskas shēmas – procesorus, ko izmanto informācijas apstrādē un atmiņu sistēmās. Datoros līdztekus centrālajam procesoram ir arī vairāki specializēti procesori, kas realizē aritmētiskās, loģiskās un vadības operācijas. Tam kalpo integrālās mikroshēmas (parasti vairāku specializētu mikroshēmu kopums) ar nepieciešamajiem elektroniskajiem elementiem. Pirmie mikroprocesori parādījās 60. un 70. gados. 1964. gadā integrālajās shēmās uz viena kvadrātcentimetra laukuma izvietojās līdz desmit elektronisko elementu, 1968. gadā – līdz pieciem simtiem, kopš 1980. gada – ap vienu miljonu, bet šodien uz viena kvadrātcentimetra izvietojas ap miljards elementu! Jaunā tehnoloģija arī krasi samazināja IS cenu, kas paplašināja to pielietojumu visdažādākajās tehnikas nozarēs, neraugoties uz asām patentu cīņām starp dažādiem ražotājiem.

Svarīgākā IS pielietojuma joma ir datortehnika. Jau 1967. gadā Džeks Kilbijs patentēja portatīvo kalkulatoru, ko *Texas Instruments* sāka ražot sērijveidā. 1971. gadā firma *Intel* producēja pirmos datoru mikroprocesorus. Kopš tā laika arī sākās digitālā revolūcija, kas turpinās līdz šodienai. Jauns posms šajā attīstības ceļā bija firmas *Apple Incorpo-*



6. attēls. Džeks Kilbijs mūža nogalē. Viņam rokās – pirmā integrētā mikroshēma (čips)

ration iPhone 2007. gada produkcija, kas mobilajā telefonā datoru saistīja ar internetu un optisko kameru, izraisot perversumu informātikā un informācijas apstrādē.

Integrālās shēmas ir atzītas par vienu no svarīgākajiem 20. gadsimta izgudrojumiem un joprojām ir būtiska daudzu elektronisko ierīču sastāvdaļa. Džeks Kilbijs un Roberts Noiss deva lielu ieguldījumu IS izstrādē, un abi fiziķi ir uzskatāmi par integrētās mikroshēmas izgudrotājiem. Nobela prēmijas piešķiršanu 2000. gadā Noiss nesa-gaidīja. Džeks Kilbijs lekcijā par godu Nobela prēmijas saņemšanai sacīja: “Sākotnējā ideja bija mana, bet tas, ko redzam šodien, kļuva iespējams tikai pateicoties tūkstošiem pasaules labāko inženieru, kuru radošais veikums uzlaboja tehnoloģiju, samazinot izmaksas un paverot ceļu masveida pielietojumiem.” [5] **E&P**

Literatūra

- [1] Braun, F., Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle, *Annalen der Physik und Chemie*, 153 (4), 556–563, 1874.
- [2] Shockley, W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors // *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 28, 435–489, 1949.
- [3] Shockley, W. *Electrons and Holes in Semiconductors*, Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1950.
- [4] Brinkman, W. F. et al., A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us, *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 32 (12), 1858 – 1865, 1997.
- [5] https://www.brainyquote.com/authors/jack_kilby