

Technologijos ir medžiagos, įgalinusios elektronikos elementų miniatiūrizaciją

Zita Sluckuvienė

Šiaulių valstybinė kolegija, Transporto inžinerijos katedros lektorė

Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution, Lithuania; Lecturer at the Department of Transport Engineering

z.sluckuviene@svako.lt

Lidija Božė

Šiaulių valstybinė kolegija, Gamybos inžinerijos studijų programos 2 kurso studentė

Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution, Lithuania; 2nd year student of the Production Engineering study program

Anotacija

Šiame straipsnyje pristatomos mikroelektronikos gamyboje naudojamos technologijos (integriniai grandynai, spausdintinė grandynų plokštė ir pan.). Apžvelgtos tradicinės puslaidininkinės medžiagos (germanis, silicis) ir kelios žinomiausios bei perspektyvios, bet šiuo metu dar tik tiriamos, puslaidininkinės medžiagos (anglies nanovamzdeliai, grafenas). Straipsnyje trumpai apibūdintas Lietuvos potencialas mikroelektronikos prietaisų gamyboje.

Pagrindiniai žodžiai: puslaidininkis, nanovamzdeliai, integriniai grandynai, spausdintinės plokštės, PIC.

Technologies and materials that have enabled the miniaturization of electronic elements

Summary

This article introduces the technologies used in microelectronics manufacturing (integrated circuits, printed circuit boards, etc.) It reviews traditional semiconductor materials (germanium, silicon) and some of the best the most famous and promising, but currently still being researched, semiconductor materials (carbon nanotubes, graphene). The article briefly describes Lithuania's potential in the production of microelectronic devices.

Key words: semiconductor, nanotubes, integrated circuits, printed circuit boards, PIC.

Įvadas

Tyrimo aktualumas. Šiuolaikinė elektronika stebina vartotojus savo įmantriais dizainais, vis tobulėjančiu funkcionalumu, naujai atrandamomis galimybėmis. Našesni įrenginiai turėtų būti dideli ir nepatogūs, bet yra atvirkščiai: kiekvieną dieną pasaulyje atsiranda kokia nors nauja elektronikos detalė ar įrenginys, kurio dydis atvirkščiai proporcingas jo galimybėms. Elektronikos elementų miniatiūrizacija yra labai svarbi todėl, kad ji leidžia kurti mažesnius ir lengvesnius įrenginius, o kartu ir padidinti jų funkcionalumą. Mažesni ir lengvesni įrenginiai yra patogesni naudoti, lengviau transportuojami ir užima mažiau vietos. Tai svarbu daugelyje pramonės šakų, pradedant buitines elektronikos prietaisais ir baigiant aeronautika, kosminės technologijos ir medicinos įrangos sritimis. Didesnės integracijos ir efektyvumo pasiekimas reiškia, kad mažesniuose įrenginiuose gali būti daugiau funkcijų. Tai sudaro didesnę galimybę kurti inovatyvius įrenginius. Naujaisi technologiniai atradimai tiesiogiai susiję su elektronikos elementų mažėjimu. Miniatiūrizacija leidžia sumažinti įvairių komponentų gamtinimo išlaidas ir energijos sunaudojimą, todėl tai yra ekonomiškai ir ekologiškai naudinga.

Puslaidininkiai yra medžiagos, kurios suteikė galimybę minimalizuoti elektronikos prietaisus ir padidinti jų produktyvumą. Nuo pat 1833 metų, kai puslaidininkių savybes pastebėjo mokslininkas

M. Faraday, šios medžiagos domino tyrėjus [16]. Bet tikrą pripažinimą puslaidininkinės medžiagos sulaukė 1948 metais, kai JAV fizikai Džonas Bardynas, Volteris Bratenas ir Viljamas Soklis išrado pirmąjį tranzistorių [16]. Puslaidininkinių medžiagų atradimas leido kurti naujus, mažesnius ir našesnius įrenginius bei suteikė galimybę išrasti pažangias elektronikos gamybos technologijas. Visa tai yra labai svarbu besivystančioms technologijoms.

Medžiagotyros srityje mokslininkai daug dėmesio skiria grafeno panaudojimui įvairiose mokslo srityse [10, 11] bei galimai jo integracijai į plačiai naudojamus elektronikos įrenginius [12]. Analizuojant mikroelektronikos technologijas, daug dėmesio skiriama lanksčioms elektronikos elementų gamybos technologijoms [2] ir anglies nanovamzdelių panaudojimui.

Tyrimo problema. Technikos progresas nemaža dalimi priklauso nuo medžiagotyros mokslo pasiekimų. Tobulinamos jau žinomos ir pasiteisinusios bei atrandamos naujos medžiagos, turinčios ypatingų savybių, leidžiančių efektyviai ir praktiškai naudoti ribotus išteklius, o tuo pačiu metu siūlyti vis naujas funkcijas ir ypatybes. Šiame straipsnyje siekiama išnagrinėti naujų puslaidininkinių medžiagų įtaką mikroelektronikos elementų gamybai.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti medžiagas, įgalinusias elektronikos elementų miniatiūrizaciją.

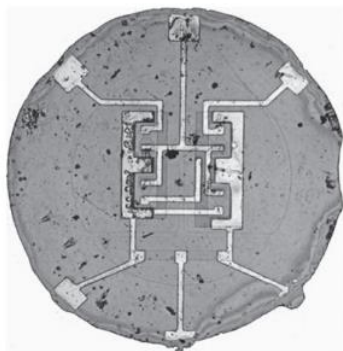
Tyrimo uždaviniai:

1. Apibrėžti mikroelektroniką įgalinusias technologijas.
2. Išanalizuoti mikroelektronikos elementų gamyboje naudojamas medžiagas.
3. Apžvelgti Lietuvos situaciją ir perspektyvas mikroelektronikos elementų gamyboje.

Tyrimo metodai – mokslo literatūros ir dokumentikos skaitmeninių išteklių analizė, sisteminimas, lyginimas, interpretavimas ir apibendrinimas. Tyrimas atliktas 2023 m. vasario-gegužės mėnesiais.

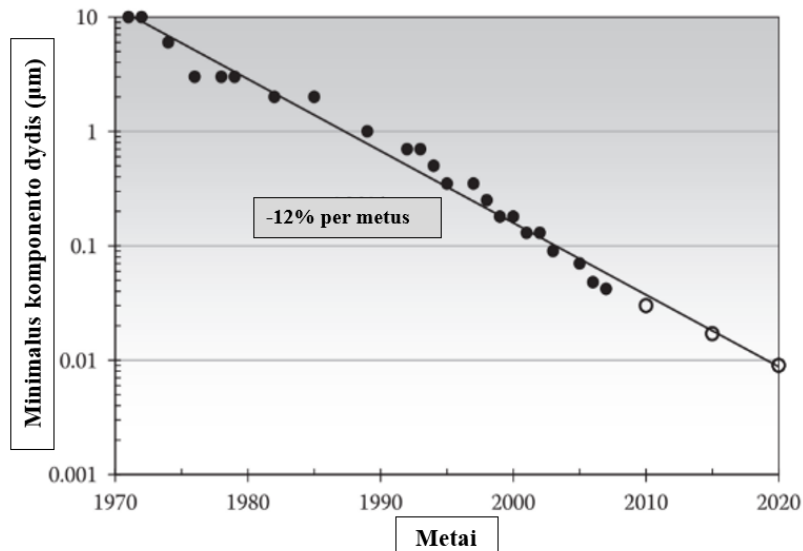
Mikroelektronikos gamyboje naudojamos technologijos

Ankstesni elektronikos elementai buvo dideli ir primityvesni, nei dabartiniai. Jie buvo gaminami iš elektroninių elementų, kurie tarpusavyje jungdavosi laidais ir sudarydavo stambių gabaritų mazgus. Elektroninės įrangos sudėtingumas, didelis atskirų elementų montavimo ir elektros instaliacijos operacijų sudėtingumas lėmė būtinybę naudoti funkciškai sukomplektuotus elektroninius komponentus, kurių gamyba būtų automatizuota. *Integriniai grandynai* (angl. *integrated circuit*) (žr. 1 pav.), kitaip vadinami *lustais*, atlieka informacijos konvertavimo, saugojimo, apdorojimo, perdavimo ir priėmimo funkcijas. Integrinis grandynas yra elektroninis komponentas, kuriame yra integruotas didelis skaičiavimo ir/arba signalo apdorojimo funkcionalumas. Tai dažniausiai yra daugybė elektroninių komponentų, pvz., tranzistorių, kondensatorių ir rezistorių, sujungtų viename mikroprocesoriuje arba mikrovaldiklyje.



1 pav. Pirmasis komercinis integrinis grandynas, sukurtas Robert Noyce „Fairchild Semiconductor“ [8]

Integrinių grandynų dydis kinta labai sparčiai. Per metus vidutiniškai elementai mažėja apie 12 proc. (žr. 2 pav.). Šiuolaikinei elektronikai tai yra labai geras rodiklis. Integriniai grandynai gali būti naudojami įvairiose elektroninėse sistemose, tokiose kaip kompiuteriai, mobilieji telefonai, televizoriai, automobiliai ir kt. Jie yra maži, efektyvūs ir ekonomiški, o montavimo procesas yra automatizuotas [7].



2 pav. Integrinių grandynų gamybos elemento dydžio mažėjimas [8]

Didžiulis integrinių grandynų pranašumas yra jų mažas dydis. Pavyzdžiui, mikroprocesorius, turintis dešimtis milijonų tranzistorių, gali būti sumontuotas viename kvadratiname centimetre. Tai leidžia įdiegti sudėtingas funkcijas net į mažus įrenginius, tokius kaip mobilieji telefonai ar planšetiniai kompiuteriai [8].

Evoliucijos varoma tendencija visame technologijų sektoriuje sukūrė didelį poreikį greitesniems, pigesniems, mažesniems, efektyvesniems įrenginiams visose gyvenimo srityje, nuo medicinos prietaisų iki telekomunikacijų ir gynybos sektoriaus. *Spausdintinė grandynų plokštė* (angl. *Printed Circuit Board (PCB)*), turėjo didelę įtaką miniatiūrizacijos procesui [6]. Organiniai puslaidininkiai yra iš esmės spausdinami esant žemai temperatūrai, todėl jie yra suderinami su pigiais plastikinių plėvelių pagrindais. Todėl spausdinamos organinės elektronikos technologijos leidžia gaminti pigius ir lanksčius elektroninius įrenginius, draugiškus aplinkai [7].



3 pav. Išmanioji etiketė, pagrįsta plonųjų plėvelių tranzistoriais (TFT) [7]

Naudojant įvairius spausdinimo procesus, buvo pagaminti lankstūs ekranai, radijo dažnių atpažinimo (angl. *Radio-frequency identification (RFID)*) žymos, išmanios etiketės ir įvairūs jutikliai, pagrįsti plonųjų plėvelių tranzistoriais (žr. 3 pav.) (angl. *Thin-film transistor (TFT)*). Šioje srityje pasiekta puikių rezultatų moksliniuose tyrimuose. Organinių puslaidininkių (angl. *Organic Semiconductors (OSCs)*) pagrindu pagaminti TFT tranzistoriai gali būti gaminami esant žemai temperatūrai ir yra labiau suderinami su spausdinimo metodais nei neorganiniai puslaidininkiai [7].

Fotoniniai integriniai grandynai (angl. *Photonic Integrated Circuits (PIC)*) yra mikroelektronikos elementai, kurie sujungia kelis optinius komponentus, tokius kaip lazeriai, modulatoriai, detektoriai ir bangolaidžiai, viename luste. PIC yra panašūs į elektroninius integrovančius grandynus (IC), kurie sujungia kelis elektroninius komponentus, tokius kaip tranzistoriai ir kondensatoriai. PIC naudoja fotonus (šviesos daleles), kad perduotų informaciją, o ne elektronus,

kurie naudojami tradicinėse elektroninėse grandyse. Tai leidžia pasiekti didesnius greičius, didesnius bangų plotus ir mažesnes energijos sąnaudas, nei tradicinės elektroninės grandys. Jie gali būti naudojami kuriant greitesnius ir energiją taupančius įrenginius. Taip yra todėl, kad PIC gali veikti dideliu tikslumu ir yra labai veiksmingi apdorojant ir perduodant duomenis. Daugybė PIC pritaikymų, įskaitant didelės spartos telekomunikacijas, didelio našumo skaičiavimus ir kvantines technologijas, lėmė sparčiai didėjantį rinkos dydį ir susidomėjimą moksliniais tyrimais [13].

Įprastose PIC technologijų platformose kaip bangolaidžio medžiaga naudojamas silicis arba silicio nitridas. Dėl aukštos kokybės gamybos procesų ir mikroelektronikos pramonės paveldo silicis yra viena iš perspektyviausių PIC medžiagų, skirtų didelio masto integracijai. Todėl per pastarąjį dešimtmetį buvo pradėti naudoti silicio PIC liejimo procesai, įgalinantys prototipų kūrimą, naudojant kelių projektų plokštes (angl. *Multi-Project Wafer, MPW*). Šis metodas drastiškai sumažino PIC kūrimo išlaidas, todėl pažangiausios technologijos tapo prieinamos pramonei ir akademinėi bendruomenei. Nors šie laimėjimai jau paspartino PIC pagrįstų produktų kūrimą ir pateikimą į rinką, technologijos nuolat tobulinamos, siekiant pagerinti našumą ir pridėtinę vertę. Kad PIC būtų dar didesnio masto, reikalingi veiksmingi derinimo mechanizmai, kompensuojantys gamybos pokyčius ir aplinkos trikdžius arba leidžiantys perkonfigūruoti įrenginį. Siekiant tobulinti dabartines PIC technologijas, standartinės platformos nuolat modernizuojamos [13]. PIC nuo 2020 metų yra aktyviai integruojami į autonomines transporto priemones bei medicininę įrangą.

Puslaidininkinės medžiagos ir jų savybės

Puslaidininkiai yra plati medžiagų klasė, kuriai būdingas specifinis laidumas, tai reiškia, kad šios medžiagos negali būti klasifikuojamos kaip dielektrikai arba metalai. Puslaidininkis yra medžiaga, kurios elektrinį laidumą galima keisti per temperatūros svyravimus, pritaikytus laukus arba priemaišų pridėjimą. Puslaidininkinių medžiagų savybių atradimas leido pasiekti didžiulių ir svarbių pasiekimų elektronikos miniatiūrizacijos srityje [9].

Puslaidininkinėms medžiagoms priskiriami germanis, silicis, selenas, telūras, kai kurie oksidai, sulfidai ir metalų lydiniai. Mokslininkų tiriamos palyginus naujos medžiagos: anglies nanovamzdėliai, kubinis boro arsenidas, grafenas. Plačiausiai naudojami yra silicio ir germanio puslaidininkiai. Šiuo metu daugiausiai puslaidininkių gaminama JAV, Pietų Korėjoje, Japonijoje, Taivane, Singapūre ir Europos Sąjungoje.

Germanis (žr. 4 pav.) (*Germanium*; pagal Vokietijos lotynišką vardą *Germania*), Ge, periodinės elementų sistemos IV A grupės cheminis elementas. Germanį 1886 m. atrado C. A. Winkleris. Germanis yra pilkos spalvos, metalinio blizgesio pusmetalis. Trapus, didesnėje nei 550 °C temperatūroje tampa plastiškas. Kristalinė gardelė – kubinė centruotojo paviršiaus. Germanio lydymosi temperatūra yra 937,2 °C. Gamtoje jis dažnai randamas, tačiau labai mažais kiekiais. Germanio buvo rasta cinko rūdose ir įvairių anglių pelenuose. Pagrindinis germanio šaltinis yra akmens anglių pelenai ir metalurgijos gamyklų atliekos [1].



4 pav. Germanis [1]

Germanis yra labai kietas, bet labai trapus ir smūgio metu skyla į mažus gabalėlius. Tačiau deimantiniu pjūklau ar kitais prietaisais jį galima supjaustyti plonais griežinėliais. Energetikos pramonė gamina dviejų tipų legiruotą germanį:

- kurio elektrinis laidumas yra įvairių rūšių, o savitoji varža yra nuo 0,003 iki 45 $\Omega \cdot \text{cm}$;

- kurio elektrinis laidumas yra nuo 0,4 iki 5,5 S·m⁻¹ ir didesnis.

Gryno germanio savitoji varža kambario temperatūroje yra 60 Ω·cm. Labai gryni germanio monokristalai naudojami kaip puslaidininkiai gaminant diodus, tranzistorius, fotodiodus, Hallo jutiklius. Germanio lydiniai su auksu naudojami juvelyrikoje ir dantų technikoje, lydiniai su siliciu ir boru – kaip termoelektrinės medžiagos [9].

Silicis (5 pav.) (*Silicium*; lot. silicium) yra antras pagal gausumą cheminis elementas Žemėje po anglies. Tai periodinės elementų sistemos IV A grupės cheminis elementas; ne metalas. Jis turi puslaidininkių ir diamagnetikų savybių. Iki 800 °C trapus, aukštesnėje temperatūroje plastiškas. Jo lydymosi temperatūra yra daug aukštesnė nei germanio: 1423° C. Gryno silicio savitoji varža kambario temperatūroje yra apie 2,3 Ω·cm.

Pagrindinis jo privalumas yra tai, kad silicį lengva išgauti, gana lengva jį apdirbti. Reaguodamas su deguonimi sudaro aukštos kokybės silicio oksidą, kuris veikia kaip izoliacinis sluoksnis tarp įvairių aktyvių elementų.

Norint padidinti elementų tankį ir integruojamų grandinių greitį, naudojami vieno kristalo ir polikristalinio silicio elementų deriniai. O norint padidinti polikristalinio silicio laidumą, jis yra legiruojamas [9].

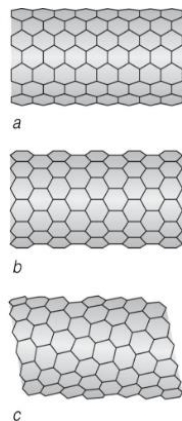


5 pav. Silicis [1]

Silicis yra plačiai naudojamas, tačiau jo savybės nėra idealios. Nors silicis lengvai praleidžia elektronus per savo struktūrą, jis yra daug mažiau pritaikytas skylėms (p-dopingas), todėl elektronams sunku praeiti. Šios dvi savybės yra svarbios tam tikrų tipų lustams. Be to, silicis ne itin efektyviai praleidžia šilumą, todėl kompiuteriai dažnai turi problemų dėl perkaitimo ir brangių aušinimo sistemų.

Anglies nanovamzdeliai yra viena perspektyviausių naujos kartos medžiagų mikroelektronikai. Ši medžiaga jau įrodė, kad gali veikti daug greičiau, nei dabartiniai silicio tranzistoriai. Bet ji turi rimtą problemą – patikimumą.

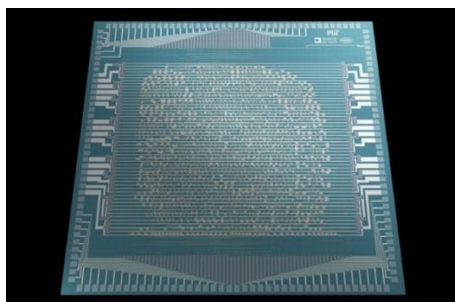
Anglies nanovamzdeliai yra vamzdiški atomų dariniai (makromolekulės), kurių skersmuo – iki kelių dešimčių nanometrų, ilgis gali būti daugiau kaip milijoną kartų didesnis už skersmenį. Jie sudaryti iš vieno anglies atomų sluoksnio (vienasieniai, skersmuo 1–2 nm) arba iš kelių vienas kitame esančių vienasienių (daugiasieniai, skersmuo 2–25 nm); jų vidus gali būti pripildytas nelydžių metalų, karbidų, oksidų. Anglies atomai sudaro heksagoninę gardelę, kuri gali būti įvairiai orientuota nanovamzdelio ašies atžvilgiu ir sudaryti krėslo, zigzago ar spiralės pavidalo struktūrą (žr. 6 pav.).



6 pav. Nanovamzdelių struktūros: a – krėslo, b – zigzago, c – spiralės [1]

Anglies nanovamzdėliai naudojami nanotranzistoriuose, didelės skiriamosios gebos mikroskopuose, kopijavimo įrenginiuose, šaltųjų elektronų šaltiniuose, dirbtiniams raumenims ir nanopluoštu jungiamoms medžiagoms sustiprinti, atsparių plastikų ir tekstilės gamyboje. Yra popieriaus pavidalo vienasienių nanovamzdėlių, naudojamų telefonų filtruose [1].

Aukštos kokybės lanksti elektronika yra ypač pageidaujama dėl jos pritaikymo galimybių nešiojamųjų įrenginių, sveikatos priežiūros prietaisų, protezų ir robotų srityse. Anglies nanovamzdėlių plonųjų plėvelių tranzistorius (angl. *Carbon Nanotube Thin-Film Transistor*, CNT TFT) gali būti naudojamas aukštos kokybės lanksčios elektronikos kūrimui dėl jo didelio laidumo, lengvo mechaninio deformuojamumo ir suderinamumo su pigiomis spausdinimo technologijomis [2]. Kadangi ši medžiaga yra labai perspektyvi ne tik elektronikos srityje, jos tyrimai vyksta iki šiol. 2019 metais vykusioje DARPA (angl. *Defence Advanced Research Project Agency*) konferencijoje *Sky Water* generalinis direktorius ir Masačusetso technologijų instituto (angl. *Massachusetts Institute of Technology*, MIT) darbuotojas Maxas Shulakeris pristatė pirmąją komerciškai prieinamą silicio integrinę plokštę su anglies nanovamzdėlių procesoriais (žr. 7 pav.) [5].

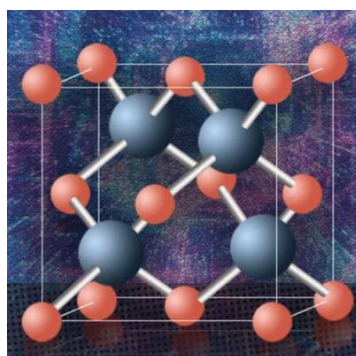


7 pav. Procesorius, pagrįstas anglies nanovamzdėlių tranzistoriais [5]

Pagrindine puslaidininkių problema išlieka medžiagos grynumas. Šis reikalavimas yra labai svarbus naudojant nanovamzdėlius. Tarp anglies nanovamzdėlių galima rasti metalinių nanovamzdėlių. Jei tranzistoriaus užtūroje bus nors vienas metalinis nanovamzdėlis iš šimtų tūkstančių, tai smarkiai pakeis tranzistoriaus charakteristikas [4].

Anglies nanovamzdėlių tyrimai vyksta ir dabar, mokslininkai tiria ir nagrinėja šią medžiagą, jos panaudojimo galimybes, bet dabar apie platų šios medžiagos naudojimą elektronikoje kalbėti dar anksti, nes medžiagos išgryninimas daro ją nepatrauklią dėl per didelių gamybos kaštų.

Masačusetso technologijų instituto (angl. *Massachusetts Institute of Technology*, MIT) mokslininkai žurnale „*Science*“ paskelbė, kad atrado idealų puslaidininkį, kuris išsprendžia būdingas siliciui problemas: elektros prietaisų kaitimą darbo metu ir tai, kad silicis pralaidus tik neigiamiems elektronams.



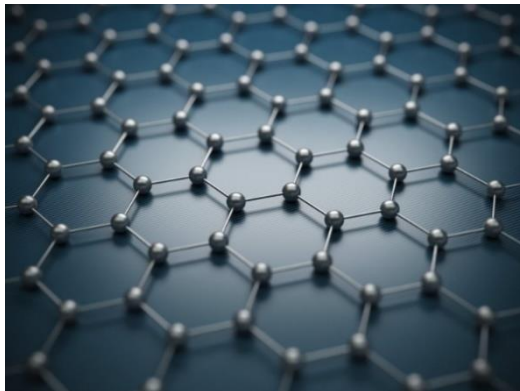
8 pav. Kubinio boro arsenido gardelės iliustracija [3]

Kubinis boro arsenidas (angl. *Cubic Boron Arsenide*, CBA) (žr. 8 pav.) yra gaminamas iš boro ir arseno mišinio, kuris yra šildomas iki labai aukštos temperatūros ir kristalizuojasi į kubinę struktūrą. MIT vadovaujantis mechanikos inžinerijos profesorius Gan Chen pavadino jį tikrai unikaliu puslaidininkių pasaulyje. „*Tai svarbu, nes, žinoma, puslaidininkiuose vienodai turime ir teigiamų, ir neigiamų krūvių. Taigi, jei kuriate įrenginį, jums reikia medžiagos, kurioje jie judėtų su mažesniu pasipriešinimu*“, sakė Chen [3].

Kubinis boro arsenidas 10 kartų geriau nei silicis toleruoja šilumą. Silicio tipinis šilumos laidumas yra 148 W/mK, varis jį pagerina tris kartus iki 401 W/mK, tačiau kubinis boro arsenidas gali išsklaidyti šilumą iki 1200 W/mK.

Pirmine tyrėjų nuomone, boro arsenidas yra idealus puslaidininkis. Boro arsenido problema yra ta, kad jį pagaminti daug sunkiau nei silicį. Junginys iki šiol buvo gaminamas tik laboratorijoje. Šiuo metu mokslininkai nėra tikri, ar jį galima naudoti praktiškai, ar apsimoka ekonomiškai. Greičiausiai jis kompiuterių pasaulyje nebus toks įprastas kaip silicis, tačiau jis gali būti naudojamas svarbiems, ypač šilumą generuojantiems komponentams, arba netgi kaip aušinimo skystis, įterptas į silicio konstrukcijas [3].

Grafenas – vienaatomis plokščias anglies atomų, susijungusių sp² ryšiu į tankios sanglaudos dvimatę, korinę, heksagoninę kristalinę gardelę (žr. 9 pav.) sluoksnis [1].



9 pav. Grafeno struktūra [1]

Už grafeno atradimą A. Geimas ir K. Novosiolovas 2010 metais apdovanoti Nobelio fizikos premija [1]. Grafenas yra medžiaga su išskirtinėmis elektrinėmis, šiluminėmis ir mechaninėmis savybėmis. Ši nauja supermedžiaga vis dar yra tyrinėjama, grafenas turi daug dar neatskleistų savybių. Grafeno makromolekulės paviršiaus plotas gali būti keli kvadratiniai metrai, o tokios makromolekulės storis yra tik vienas atomas, todėl grafenas dažnai vadinamas naujosios medžiagų grupės atstovu - 2D medžiaga. Dėl stiprios cheminės jungties tarp anglies atomų grafenas turi stiprų termodinaminį stabilumą. Jis yra atsparus oksidacijos cheminei reakcijai. Grafenas yra ypatinga medžiaga, jo elektrinis laidumas yra apie 1000 kartų geresnis nei vario. Be to, grafenas yra puikus šilumos laidininkas ir optiškai skaidrus [10].

Bandant atnaujinti iš silicio gaminamus kompiuterinius lustus, buvo tyrinėta daug naujų medžiagų: grafenas, mėlynasis fosforenas, telurenas ir kitos medžiagos. Labai svarbūs yra galios sąnaudų, skaičiavimo dažnio, mikrosistemų šilumos valdymo klausimai. Be mikrofluidinių sistemų pasyviai šilumos valdymui, tyrėjai domisi ir kietojo kūno termoelektrinio aušinimo ir šaldymo technologija, kuri yra ne skysta, kompaktiška ir lengvai suderinama. Kuriant termoelektrines aušinimo/šaldymo sistemas, buvo bandoma daug naujų medžiagų, pavyzdžiui, bismuto plonieji sluoksniai, silicio ir germanio nanovamzdėliai, švininio telurido nanokompozitai ir kitos. Grafeno pagrindo dariniai kelia didelį susidomėjimą, nes jie lengvai gali būti sutankinami su kitomis sluoksniuotomis medžiagomis ir pritaikyti ateities elektronikos srityse [11].

Grafeno integracijai reikalingas medžiagų integravimo koncepcijų paradigmos poslinkis. Įprastuose puslaidininkiuose medžiagų savybes daugiausia lemia didžioji puslaidininkio dalis, o paviršius gali būti valomas ir modifikuojamas, nepažeidžiant medžiagų savybių. Kita vertus, grafenas ir kitos 2D medžiagos susideda tik iš paviršiaus, ir kiekviena paviršiaus modifikacija keičia medžiagų savybes. Ši savybė leidžia naudoti grafeną kaip aplinkos jutiklį, tačiau tai kenkia tikslų prietaisų gamybai [12].

Puslaidininkių tyrimai Lietuvoje

Lietuvoje puslaidininkių tyrimai mena dar penktą praėjusio amžiaus dešimtmetį, neilgai trukus po to, kai pasaulyje buvo atrastas tranzistorius. Šiuo metu VU, KTU, VILNIUS TECH tyrimų

institutuose bei Fizikos ir technologijų mokslų centre vykdomi fundamentiniai ir nišinių technologijų taikomieji puslaidininkų tyrimai atspindi didelį sukauptą mokslinį įdirbį ir kompetencijas. Lietuvos mokslinis ir gamybinis potencialas yra didelis. Lietuvių lazerių pramonės atstovai (UAB „Ekspla“, UAB „LIDARIS“, UAB „Femtika“ ir pan.) dabar yra žinomi pasaulyje ir pelnė ne vieną tarptautinį apdovanojimą.

Šiuo metu iškyla nemažai iššūkių, susijusių su mikroelektronikos elementų pramonės plėtra Lietuvoje. Vienas iš tokių iššūkių yra specialistų trūkumas. Tai galima iliustruoti Lietuvos lazerių sektoriaus pavyzdžiu. Lietuvos lazerių įmonės, kuriose šiuo metu dirba apie tūkstantį darbuotojų, pasak ekspertų, auga maždaug po 10-15 % per metus, o Lietuvos universitetai per metus paruošia tik apie 120 fizikos specialistų, kurių didelis poreikis ir kituose aukštųjų technologijų pramonės sektoriuose. Darbo rinkoje specialistų stygius jaučiamas ne tik tarp fizikų, tačiau bene visose STEM (angl. *Science, Technology, Engineering, Maths*) mokslų srityse. Antras veiksnys – prastas bendradarbiavimas tarp mokslo ir pramonės. Lietuvos pramonė, neskaitant kelių išimčių, didžiąja dalimi nėra kurianti ir todėl nėra imli mokslui. Fundamentinis mokslas be imlaus verslo įsisavinimo pats savaime į rinką nepatenka. Trečias iššūkis - realizavimo rinkų trūkumas. Šiuo metu Lietuva neturi lustų tiekimo grandžių į užsienį, ji yra importuotoja ir neturi susikurto patikimo mikroelektronikos ir lustų tiekėjo vardo. Ribotai dalyvaujama ir kitose pramonės šakose, kuriose yra didelis lustų poreikis [14].

2023 metų sausio mėnesį Lietuvos aukštųjų technologijų įmonių grupė „Teltonika“ pasirašė technologinio bendradarbiavimo sutartį su Taivano Pramonės technologijų tyrimų institutu (ITRI). Pagal šią sutartį ITRI su „Teltonika“ pasidalins technologijomis, kurių pagrindu Lietuvoje galės būti pradėta kurti puslaidininkų lustų pramonė. Pagal susitarimą „Teltonika“ įgis teisę naudoti ITRI sukurtas puslaidininkų lustų gamybinių technologijų ir prietaisų licencijas, gaus pagalbą rengiant detaliuosius projektus ir inžinerinius mokymus darbuotojams. Tai yra svarbiausios dalys, ruošiantis Lietuvoje įgyvendinti puslaidininkų lustų projektus. „Teltonikos“ įmonių grupė Vilniuje planuoja vystyti tokias naujas veiklas kaip puslaidininkų lustų projektavimas, puslaidininkų lustų gamyba, puslaidininkų lustų surinkimas ir testavimas bei galios modulių gamyba [15].

Išvados

Šiuolaikinis mokslas nestovi vietoje ir kasdien pasaulį išvysta naujos technologijos, kurios veikia šiuolaikinės elektronikos gabaritus bei našumą. Šiuolaikinės elektronikos miniatiūrizacijos tendencijos rodo, kad ateityje tikimasi toliau mažinti elektronikos elementų dydžius ir padidinti jų efektyvumą. Tai reiškia, kad įrenginiai taps dar mažesni, lengvesni, galingesni ir labiau funkcionalūs.

Apžvelgus populiariausias puslaidininkines medžiagas, galima padaryti išvadą, kad šiuo metu pramonėje naudojamos medžiagos yra patikimos, išbandytos laiko ir lengvai prieinamos. Kol kas anglies nanovamzdeliai, boro arsenidas, grafenas yra neprieinami plačiam naudojimui. Jų gamybos kaštai yra per dideli, palyginus su jau pasitvirtinusių medžiagų gamyba.

Lietuva turi didelį potencialą mikroelektronikos prietaisų gamybos srityje. Dabar ši pramonės sritis Lietuvoje vis auga ir stiprina savo pozicijas. Lietuvių lazerinių technologijų kūrėjai jau sulaukė tarptautinio pripažinimo. Tikimasi, kad ir „Teltonikos“ projekto su ITRI dėka Lietuvoje bus įdiegtos puslaidininkų lustų gamybos technologijos.

Elektronikos komponentų miniatiūrizacija išlieka svarbi ir skatina technologijų vystymąsi, kurdama naujas galimybes ir patobulinimus, kurie turės didelę įtaką visuomenės kasdieniam gyvenimui.

Literatūra

1. Visuotinė lietuvių enciklopedija. Lietuva: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, 2001. <https://www.vle.lt/>
2. LEI, Ting, et al. Low-voltage high-performance flexible digital and analog circuits based on ultrahigh-purity semiconducting carbon nanotubes. *Nature communications*, 2019, 10.1: 2161. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10145-9>

3. CHANDLER, David L. MIT researchers say cubic boron arsenide is the best semiconductor material ever found, and maybe the best possible one. Massachusetts Institute of Technology, 2022. <https://news.mit.edu/2022/best-semiconductor-them-all-0721>
4. TIMMER, John, 16-bit RISC-V processor made with carbon nanotubes, *Nature*, 2019. <https://arstechnica.com/science/2019/08/16-bit-risc-v-processor-made-with-carbon-nanotubes/>
5. HILLS, G.; LAU, C.; WRIGHT, A., et al. Modern microprocessor built from complementary carbon nanotube transistors. *Nature*, 2019, 572, 595–602. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1493-8>
6. NAGARGOJE, Shantanu. Reliability of Micro Vias in High Density Connection Printed Circuit Boards. 2022. <https://www.proquest.com/openview/6577e634974448aeef2d19f1792f344a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
7. MATSUI, Hiroyuki; TAKEDA, Yasunori; TOKITO, Shizuo. Flexible and printed organic transistors: From materials to integrated circuits. *Organic Electronics*, 2019, 75: 105432. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566119919304513>
8. AYERS, John E. *Digital Integrated Circuits: Analysis and Design*, Second Edition. USA: CRC Press, 2018. https://www.google.lt/books/edition/Digital_Integrated_Circuits
9. ТИЛЛАБОЕВА, М. Р. Физика полупроводников // *Современные инновации*. 2017. №6 (20). <https://www.cyberleninka.ru/article/n/fizika-poluprovodnikov>
10. PETOHLJEB, Toni. Grafen-materijal budućnosti, *Rijeka*, 2022. <https://repository.ricent.uniri.hr/islandora/object/ricent:188>
11. TANG, Shuang, et al. Optimized Active Cooling and Refrigeration using Antidoted Graphene for Heat Management of Microelectronics. *arXiv preprint arXiv:2201.05847*, 2022. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.05847.pdf>
12. RUHL, Guenther, et al. The integration of graphene into microelectronic devices. *Beilstein journal of nanotechnology*, 2017, 8.1: 1056-1064. <https://www.beilstein-journals.org/bjnano/articles/8/107>
13. ERRANDO-HERRANZ, Carlos, et al. MEMS for photonic integrated circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26.2: 1-16. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8847362>
14. Lietuvos puslaidininkių sektoriaus strateginė apžvalga, Mokslo, inovacijų ir technologijų agentūra, 2022. <https://mita.lrv.lt/uploads/mita/documents/files/Lietuvos%20puslaidininkiu%20sektoriaus%20strategine%20apzvalga.pdf>
15. „Teltonika“ pasirašė technologinio bendradarbiavimo sutartį su Taivano partneriais, 2023-01-18, LR ekonomikos ir inovacijų ministerija. <https://eimin.lrv.lt/lt/naujienos/teltonika-pasirase-technologinio-bendradarbiavimo-sutarti-su-taivano-partneriais>
16. ŁUKASIAK, Lidia; JAKUBOWSKI, Andrzej, History of semiconductors. *Journal of telecommunications and information technology*, 2010. https://djena.engineering.cornell.edu/hws/history_of_semiconductors.pdf