

ELEKTROONIKUTELT INIMESELE JA ÜHISKONNALE: EILSED MÕTTED TÄNA TEOKS, TÄNASED HOMME

Mart Min

Tallinna Tehnikaülikooli elektroonikainstituut

SISSEJUHATUS

Missugune osa teadusest, tehnoloogiast ja inseneriasjandusest on elektroonikute jagu? Elektroonika oleks nagu pea kõikjal, samas pole just üheselt selged valdkonnad, kus elektroonika roll oleks määrav. Elektroonika justkui lahustuks infotehnoloogias ja arvutitehnikas, aparaadiehituses ja meditsiinitehnoloogias, energeetikas ja olmetehnikas.

Kindlaks pärusmaaks on siiski vast pooljuhtide ja mikroelektroonikaga seotud valdkonnad, kaasa arvatud tohutuid edusamme tegev ülikeerukate kiipide (chip – integraallülitus või mikroskeem) arendamine.

Ülalkirjeldatut kinnitab Rootsi Kuningliku Teaduste Akadeemia pressiteade 10. oktoobrist 2000: "...Akadeemia otsustas anda tänavuse Nobeli füüsikapremia teadlastele ja leiduritele, kelle tööd panid aluse kaasaegsele informatsiooni ja kommunikatsiooni tehnoloogiale, eriti just kiiretoimeliste transistoride, laserdiodide ja integraallülituste leiutamise läbi. Ühise Nobeli preemia said aastal 2000 kolm elektroonikut: venelane Žores Alfjorov A. F. Joffenimelisest Peterburi Füüsika-Tehnika Instituudist ja Ameerika sakslane Herbert Krömer Santa Barbara Kalifornia Ülikoolist "pooljuhtide heterostruktuuride arendamise ja rakendamise eest kiirtoime- ja optoelektronikas" ning ameeriklane Jack Kilby firmast Texas Instruments "tema panuse eest integraallülituse leiutamisesse".

Elektroonikal on tihe seos loodusteadustega (füüsika, keemia) ühelt poolt ja inseneriteaduse ning leiutamise teiselt poolt. On väga sümptomaatiline, et tervelt pool 2000. aasta Nobeli füüsikapreemiaga kaasnevast summast läks seekord elektroonikainseneri ja leiduri Jack Kilby kätte. Raske on leida sarnast tehnikaharu, kus baasteadus, arendus- ja inseneritöö ning tööstuslik tootmine oleksid üksteisele nii lähedal kui elektroonikas.

MIS ON EESTIS TOIMUNUD JA MIS ON TEOKSIL?

On siis ülalkirjeldatud nobelistide lugu iseloomulik ka meie koduse elektroonika arengule? Mõnevõrra üllatuslikult on see tõepoolest nii, ehkki "vana" elektroonikatööstus kukkus kokku 1990ndate aastate alguses, tõmmates osaliselt kaasa ka teaduse ja õppetöö. Töötuks jäi ligi 15 tuhat inimest, sealhulgas tuhanded insenerid ja sadakond teadlast/õppejõudu, kellest erialase töö on taas leidnud vähesed. Varasemad saavutused, kas või kosmoselabori MIR pardainstrumendid, tuntust toonud jõuelektroonika komponendid, pooljuhtseadised ja laserseadmed, mõõte- ja raadioaparatuur ning mikroskeemid ja mikroarvutid, samuti välisriikides patenditud skeemilahendused, vajusid nostalgilisse minevikku.

Õnneks kontsentreerus tõsine rahvusvaheline teadus- ja arendustöö Tallinna Tehnikaülikooli ja Cybernetica AS navigatsioonisüsteemide osakonna EKTA juurde. Tänapäevaks on lisandunud mitmed eraõiguslikud firmad, mille juures on käimas rakendusuringud ning kus töötavad doktorikraadiga teadurid, näiteks olgu firmad Analoogdisaini AS, National Semiconductor Estonia, ArtecDesign, AS Clifton, M&T Elektroonika. Välja kujunenud on sidemed tugevate Põhjamaade ja USA firmadega, kusjuures mitmega neist on käimas lepingulised uurimistööd. Võiks öelda, et tänaseks on juba taastumas uurimis- ja arendustegevus tosina aasta eest olnuga võrreldavas mahus, ainult partnerid on teised, töö mõtestatum ja tulemusedki kaalukamad.

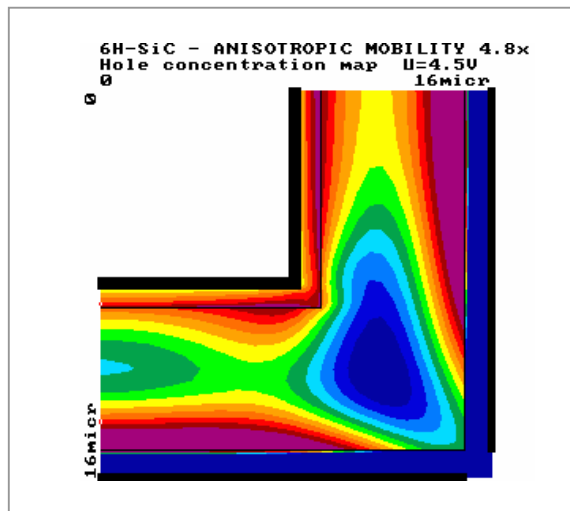
Uusi perspektiive avab tehnoloogia arenduskeskuste programmi käivitamine. Elektroonikute projekt "Elektroonika ja kommunikatsiooni tehnoloogiate arenduskeskus ELKO" pälvis esialgse heakskiidu. Oluliseks sammuks on teadustegevuse koordineerimine Elektroonika ja bioonika tippkeskuse raames, mis moodustati TTÜ juures 2002. aasta kevadel.

POOLJUHTELEKTROONIKA

Ei ole meil enam tuhandete töötajatega mikroelektroonikatehast Tondi Elektroonika ega jõupooljuhtseadiste uurimise ja arendamisega tegelevat Piritäe tee instituuti koos tuhandepäälise töötajaskonnaga tehasega. On aga uued mikrokiipide disainifirmad AnaloogDisaini AS ja National Semiconductor Estonia, Inc. (endine ARSmikro), kus parkümmend eestlast projekteerivad aastas kümneid tellijale orienteeritud mikrolüliti. Disainitakse mikrolüliti telekommunikatsiooni- ja autotööstusele ning meditsiini tarbeks, näiteks implanteeritavatele närupooljuhtühendusega kuuldeaparaatidele ja katseliselt ka südamestimulaatoritele. Elektroonikafirmas ArtecDesign Group arendatakse ühekiibi arvuteid koostöös Ameerika firmadega. Mikrolülite tootmistehnoloogiat Eestis pole, meie firmad on "tootmiseta vabrikud" (fabless factory) tüüpi. Toodeatakse seal, kus tagatakse parim hinna/kvaliteedi suhe, näiteks Taivani. Küll aga töötab meil Tartus uute materjalide (GaAs) baasil jõupooljuhtseadiseid tootev ja arendav firma AS Clifton.

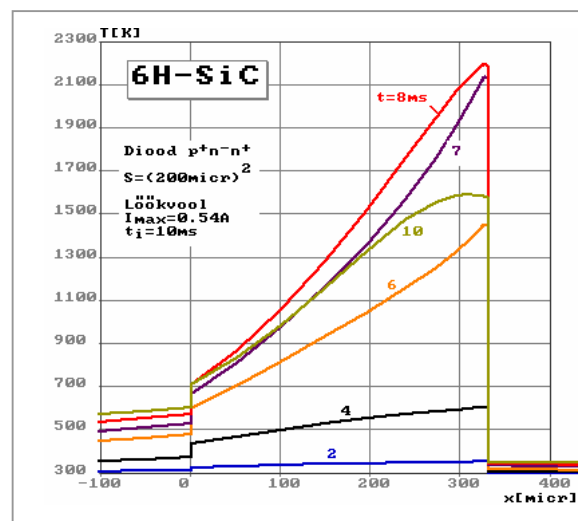
Kas on taastuval ja uueneval ettevõtlusel ka olulist seost Eesti teadusega? Ühte aspekti sai juba mainitud, nimelt töötab nendes firmades kümnekond doktorikraadiga inimest, kellest vähemalt osa on Eesti teadusmaastikul hästi tuntud. Mitmed firmade töötajad õpivad aga doktorantuuris TTÜ juures. Nende firmade ja TTÜ vahel on sõlmitud pikaajalised finantsilised tagatud uurimislepingud, sest eralduskiht baasteadusest tootmistehnoloogiani on mikroelektroonikas sedavõrd õhuke, et koostöö olemasolu on lihtsalt eksistentsi tingimus mõlema poole jaoks. Selles, et USA tuntud elektroonikakontsern National Semiconductor ostis ära disainifirma ARSmikro, oli oma osa ka perspektiivse koostöö olemasolul ülikooli ja selle teadusega.

Mis on siis silma hakanud Eesti teadlaste tööst pooljuhtelektroonika vallas? Vast esmajoones uute pooljuhtmaterjalide elektrilis-füüsikaliste omaduste uurimine ja selle tulemustel põhinev pooljuhtstruktuuride numbriline modelleerimine ning nendes struktuurides toimuvate elektriliste ja termiliste protsesside simuleerimine arvutil (joonised 1 ja 2). Selleks töötati välja arvutisimulaatorite perekond DYNAMIT, mis juurutati USA firma Silvaco International produktis – jõuelektronika komponentide projekteerimise tarkvarasüsteemis GIGA/ATLAS. Uut hoogu on andmas meie uurimisrühma eeldatav lülitamine Euroopa Liidu 6. Raamprogrammi toel organiseeritavasse laia keelutsooniga pooljuhtide



Joonis 1.

Simulaatoriga SiC-DYNAMIT-2DT arvutatud laengu-kandjate tihedusjaotus päripingestatud 6H-SiC diodstruktuuris, kus liikuvuste anisotroopia kutsus esile paradoksaalse laengute kuhjumise väiksema liikuvusega suunale.



Joonis 2.

Simulaatoriga SiC-DYNAMIT-1DT arvutatud temperatuurijaotuste dünaamika SiC valgusdiodi reaalse lõkkvooleksperimendi korral struktuuri purunemiseelses režiimis, kus lokalne hetketemperatuur jõuab väärtuseni 2200°K.

(SiC, GaAs jt) uurimise ja rakendamise koostöövõrku (Network of Excellence).

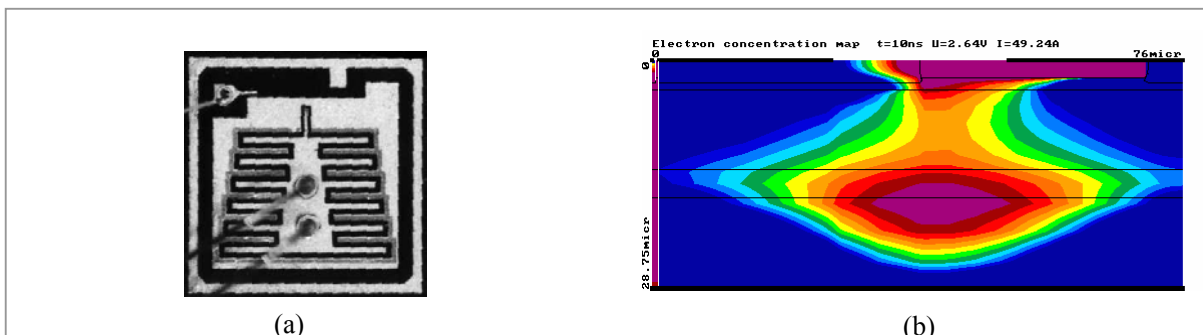
Osutub, et tööstuslikult perspektiivsed ränikarbiidi polütüübid 4H- ja 6H-SiC on makroskoopiliselt anisotroopsed materjalid, st et elektrivoolu tugevus katsekehas sõltub mitte ainult rakendatud elektrivälja tugevusest, vaid ka selle suunast kristallograafiliste telgede suhtes. Näiteks tuntud materjali räni (Si) korral niisuguseid komplikatsioone ei esine.

Kui hetkel veel on pooljuhtelektroonikas valitsevaks materjaliks keemiline element räni (Si), siis on teed rajamas selle keemiline ühend – nn laia keelutsooniga materjal ränikarbiid (SiC). Esmajoones jõuelektroonikas, kus on tarvilikud erakordselt suured voolutihedused, millega kaasneb kõrge sisemine temperatuuritõus. Aga samuti seal, kus töökeskkonna temperatuur on kõrge, näiteks sise põlemismoo-

tori põlemiskambris või siis kosmoseaparaadi töötamisel planeet Veenuse atmosfääris (450°C). Analüüs näitab, et SiC struktuuride temperatuuritaluvus ulatub 2000°C, vt joonis 2. Väljapaistev on samuti ränikarbiidi radiatsioonikindlus. Perspektiivne on SiC kasutamine raadioside saatjates, kus suured võimsustihedused on esmatähtsad.

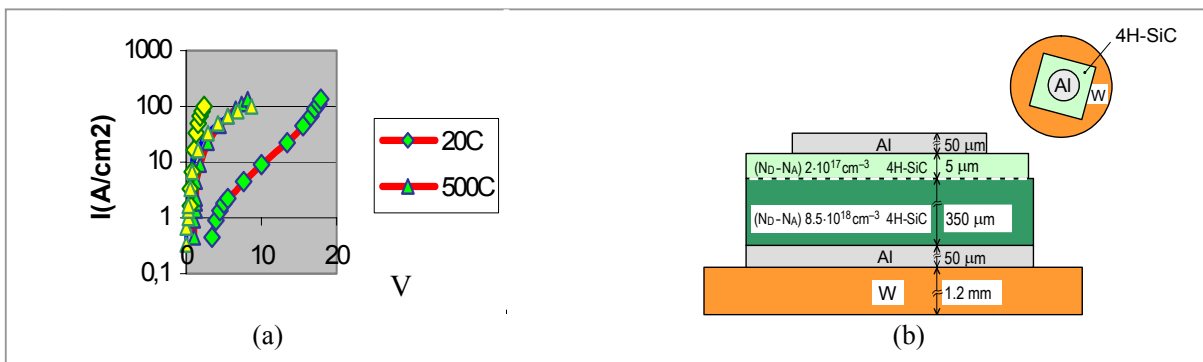
Perspektiivsed on teisedki laia keelutsooni gruppi kuuluvad materjalid, nagu galliumnitriid (GaN) ja teemant (C), kusjuures üks neist – galliumarseniid (GaAs) – on TTÜ teadlaste toel juba kasutusele võetud. Käimas on originaalsete GaAs jõudiodide ja pingekordistite katsetootmine firmas AS Clifton. Samuti on TTÜ-s välja töötatud ülikiire (lülitusaeg 10ns) keskvoimsusega (50A, 60V) kaksiktüristor Soome firma Noptel Oy tellimusel (joonis 3).

Joonisel 4 on esitatud TTÜ-s välja töötatud metall-pooljuht-siirdega SiC Schottky jõudiodid.



Joonis 3.

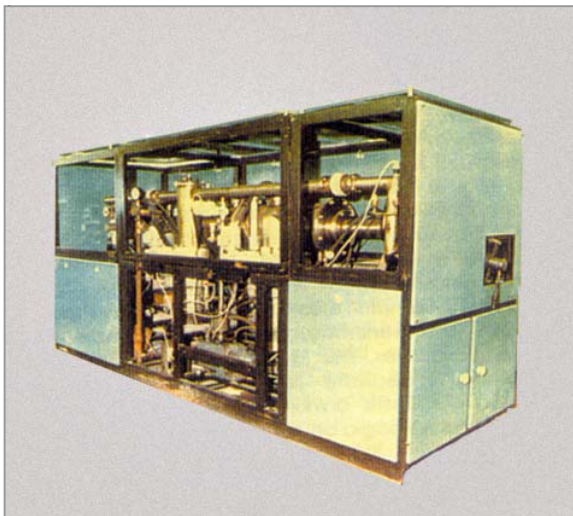
Ülikiire 10ns lülitumisfrondiga kaksiktüristori 2mm x 2mm kristalli pealtvaade (a) ja simulaatoriga DYNAMIT-2DT arvatud elektronide injektioonijaotus (b) voolu kiire kasvu etapil.



Joonis 4.

SiC diodi päri voolu ja pingesõltuvused erinevatel temperatuuridel (a) ja diodi pilooteksemplari patenditud struktuur (b).

Võimsate Schottky diodide valmistamiseks on TTÜ teadlased välja töötanud vastava madala energiatarbega suurepinnaliste pooljuhtstruktuuride metalliseerimise tehnoloogia, kasutades elektroonika-instituudi tehnoloogialaboris üles seatud vaakuum-difusioonkeevituse seadet UDS-6 (joonis 5). Väidetavalt on meie teadlased selle tehnoloogia abil saanud kõige suurema kasuliku pinnaga kontakti SiC ja metalli vahel (50mm²) maailmas!



Joonis 5.

Vaakuum-difusioonkeevituse seade UDS-6, mille abil on valmistatud joonisel 4 esitatud SiC diodi pilooteksemplarid.

SÜSTEEMIELEKTROONIKA

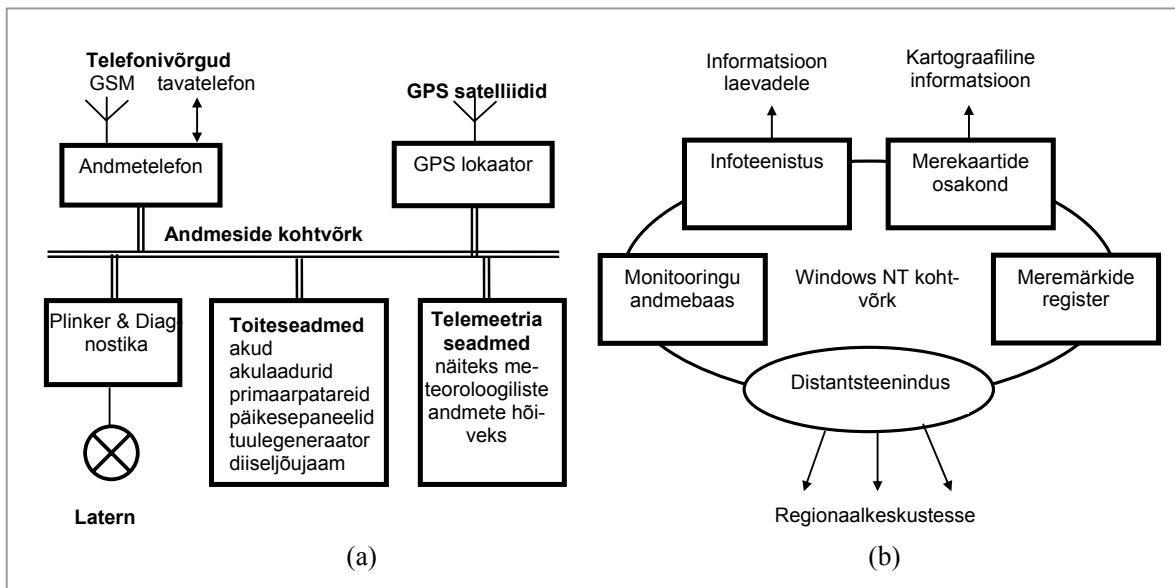
Selles alalõigus kirjeldatakse elektroonikute töid ja kordaminekuid mõõte-, andmehõive-, juhtimise ja monitooringu ülesannete täitmisel, kaasa arvatud nende süsteemide komponendid, nagu signaaliprotsessorid ja nende funktsioneerimise algoritmid, sidesüsteemide sõlmed jms. Uurimistööd selles valdkonnas viiakse läbi peamiselt sihtfinantseeritava teema “Seire- ja andmehõivesüsteemid” raames TTÜ elektroonikainstituudi (alusuuringud) ja Cybernetica AS (rakendusuuringud) jõududega. Uurimistöö sihiks on leida kõige mõistlikumad teed erinevate süsteemikomponentide elektrilise, energia- ja informaatilise ühilduvuse saavutamiseks. On ju tänapäeva elektroonikas ühes süsteemis koos kasutusel pidevatoimelised ehk analoogkomponendid, diskreettoimelised ehk impulss-sõlmed, samuti

puhtdigitaalsed ehk loogikalülitused ning täisnumbrilised arvutikomponendid (kontrollerid, signaaliprotsessorid, mikroarvutid). Ratsionaalselt toimivates süsteemides peaksid kõik need erinevat liiki komponendid omavahel sobima. Esmajoones elektriliselt ja seejärel informaatiliselt, mis tähendab süsteemikomponentide ühilduvust töödeldava, säilitatava ja transporditava infohulga ja sellega ümberkäämise kiiruse suhtes.

Oluline roll on siin signaalide analoog-digitaal (A/D) ja digitaal-analoog (D/A) muundamise meetodite analüüsil. Tehtud on ettepanek käsitleda nii analoog-, diskreet-, kui digitaalsõlme ühe ja sama parameetri – efektiivse bittide arvu (ENOB – effective number of bits) järgi, mis peaks süsteemi komponentidel ligilähedane olema. Energeetiline ühilduvus tähendab tasakaalu energiaga varustamise ja tarbimise vahel. Põhiküsimuseks on hakkama saamine ülipiiratud energiaressurssidega, sest tänapäeva süsteemid on sagedasti patarei (aku-)toitega kantavad ja tasku pistetavad asjad (mobiiltelefon), või koguni naha alla paigaldatavad mikrovahendid (implanteeritavad meditsiiniseadmed).

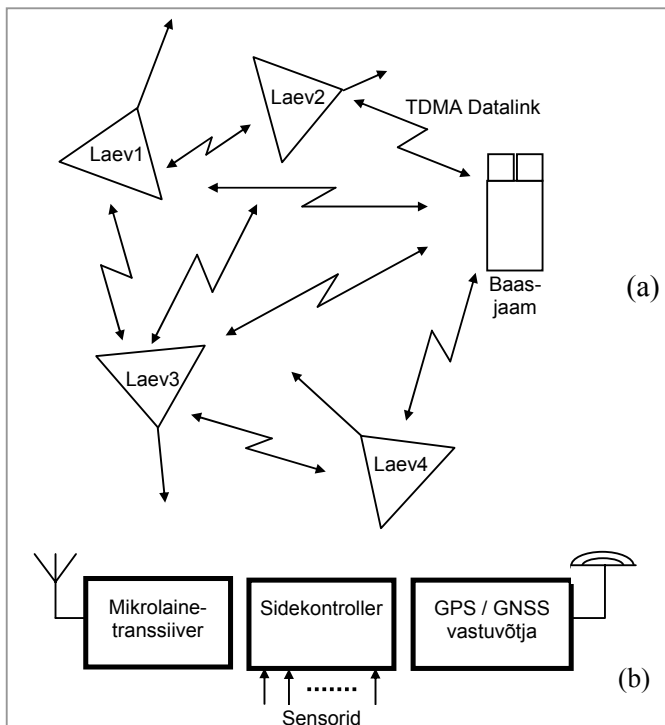
Eeltoodut kokku võttes on tegemist süsteemi-integratsiooni meetodite uurimise ja arendamisega. Need meetodid on kasutamist leidnud paljudes infrastruktuuri arendamise ülesannetes Eesti riigi ja ühiskonna jaoks. Esmalt mainiksin automaatse valvesignalisatsiooni süsteemi turvafirmade tellimisel (TTÜ), väljatöötamisel on Tartu linna tänavavalgustuse jälgimise ja juhtimise süsteem. Eraldi tuleks märkida ulatuslikku projekti veeteede valgusnavigatsioonisüsteemide automatiseerimiseks (Cybernetica EKTA), mis mobiilse GSM andmeside ja globaalse positsioneerimise süsteemi GPS abil seob ühtsetesse lokaal-, regionaal-, ja tsentraalkeskustesse (joonis 6) tuletornid, poid, sadamatuled ja muud laevasõidu valgusmärgid ning navigatsiooni alamsüsteemid. Selle projekti järgi on üles ehitatud terved Eesti ja Leedu merenavigatsioonisüsteemid ning osaliselt ka Läti sadamate (Ventspils, Liepaja, Rii) ja Kaliningradi sadama omad. Lisaks eksporditakse valgussignalisatsiooni süsteemide elektroonseid komponente Rootsi ja Inglismaale.

Käesoleval hetkel on väljatöötamisel Tallinna sadama ja selle akvatooriumi mitmepoolse transponderside baasil toimiv ajajaotusega (TDMA) raadio-navigatsiooni süsteem koos juurde kuuluva informaatilise osaga. Töö lõpp-produktina peaks valmima VTIMS – vessel traffic informational and management system (joonis 7).



Joonis 6.

Meremärkide lokaalse (a) ja tsentraalse (b) juhtimise ja jälgimise keskuste struktuur.



Joonis 7.

Laevadevaheline ning laevade ja kalda vaheline transponderside korraldus VTIMS navigatsioonisüsteemis (a) ning transponderi struktuurskeem (b).

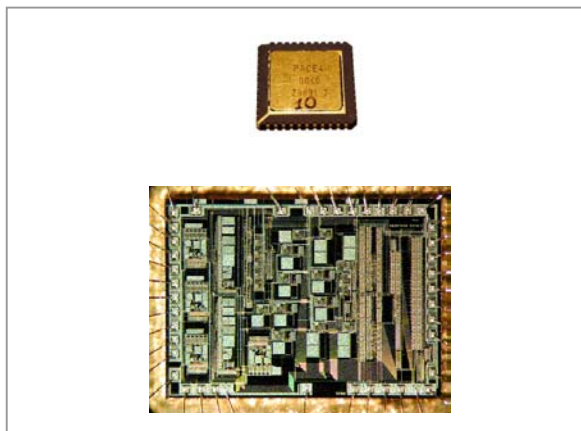
Tänu meie elektroonikateadlaste ja -inseneride professionaalsusele on Cybernetica AS osa võtnud mitmesuguse otstarbega radarseiresüsteemide uurimisest ja arendamisest Eestis.

Kui radarsüsteemide mõjuvälgus geograafia võib ulatuda sadadesse kilomeetritesse, siis ühel pooljuhtkristallil realiseeritud mikrosüsteemide geomeetriselised mõõtmed piirduvad paari millimeetriga, kusjuures süsteemi komponentide mõõtmed jäävad mikromeetrite suurusjärku. TTÜ teadlased ja insenerid on osalenud ka selliste mikrosüsteemide väljatöötamisel, mis sisaldavad nii analoog-, diskreet- kui digitaalkomponente.

Näideteks võiks olla kuni 1,2 GHz sageduseni töötav automaatse faasisünkronisatsiooniga (PLL – phase locked loop) sagedussüntesaator (PLL synthesiser), mis töötati välja siduteooria ja -disaini õppetoolis NOKIA uurimiskeskuse(Soome) tellimusel, ning elektrilise bioimpedantsi analüsaator, mis töötati välja elektroonikainstituudis firma St.Jude Medical Sweden tellimusel. Mõlemad mikrosüsteemid valmistas Analooğdisaini AS (Eesti) partner Micro Analog Systems Oy (Soome).

MEDITSIINIELEKTROONIKA

Selle sajandi esimesel kümnendil saab teoks pooljuhtstruktuuride ja bioloogiliste kudede sümbioosi laialdane rakendamine meditsiinis. Teame juba närvide ja elektroonikakiipide ühendamise edukatest rakendustest kuulde- ja nägemisaparaatides. Peagi on järgnemas implanteeritud kiipide kasutamine transplanteeritud organite seisundi jälgimiseks ja vajaduse korral ka juhtimiseks. Eesti elektroonikud ja meedikud töötavad selles põnevas valdkonnas



Joonis 8.
Bioimpedantsi mõõtmise kiip ja selle kristalli ehitus suurendusega 20.

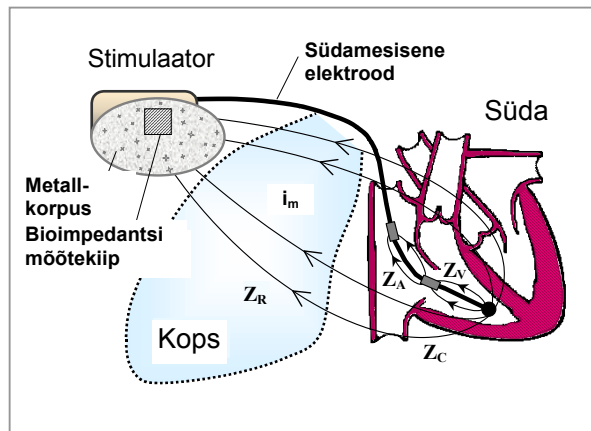
KOKKUVÕTE

Eesti elektroonikud on tihedas koostöös välismaa kolleegidega aktiivselt lülitunud Eesti riigi ja ühiskonna ees seisvate ülesannete lahendamisse, kaasa

koos Karolinska Instituudi ja firma St.Jude Medical Sweden teadlastega südame töö jälgimise ja juhtimise alal koos rakendustega südamestimulaatorites.

Seoses hiljutise lülitumisega EL 5. Raamprogrammi projekti täitmisesse on meie teadlaste tööga liitunud Ragnar Granit Instituudi teadlased Soomest. Eristavaks omapäraks on meie töö juures kudede elektrilise bioimpedantsi muutumise ärakasutamine informatsiooni saamiseks kogu organismi ja selle organite (süda, kops) funktsioneerimise kohta. Bioimpedantsi mõõtmise ja analüüsi kaudu õnnestub kätte saada seos organismi füüsilise töö mahu, südame tegevuse intensiivsuse ja südame potentsiaalse võimekuse vahel. Meetodid ja vahendid selle seose praktiliseks kasutamiseks südamestimulaatorites on patentimisel Euroopa Liidus ja USA-s.

Oma meetodi efektiivsuse katsetamiseks töötasid TTÜ elektroonikainstituudi teadlased välja vastava bioimpedantsi mõõtmise kiibi (joonis 8), mis monteeritakse südamestimulaatori metallkorpusesse (joonis 9).



Joonis 9.
Südamestimulaatorisse monteeritud bioimpedantsi mõõturi lülitus südamesisese elektroodi abil, kus Z-tähistatud vastavad osaimpedantsid ning i_m on mõõtevool.

arvatud majandustegevuse edendamine, kaitsevõime tugevdamine ja tervishoiu parandamine. Artiklis on käsitletud peamiselt teadlaste töö praktilisi tulemeid

koostöös ettevõtlusega. Autor peab seda tööloiku väga tähtsaks akadeemilise uurimistöö kõrval. Eraettevõtluse huvi on kõigepealt üheks objektiivsemaks indikaatoriks teadlaste töö tulemuste väärtuse ja vajalikkuse kohta. Teiseks on ettevõtluse tellimused kaasfinantseerimise allikaks teadustööle. Ja kolmandaks, teadlased ja ettevõtlus koos loovad kohaliku infrastruktuuri lokaalse tegevuse eduks. Vastasel korral tuleks meil vähese motiveerituse tõttu liituda rahvusvaheliste töökollektiividega ning jätkata oma tegevust välismaal.

Suhteliselt edukad on elektroonikud olnud ka akadeemiliste uuringute alal. Rahuldavalt töötab doktorantuur, igal aastal pälvib doktorikraadi paar teadu-

rit, sama arv noori ka alustab. Teadustöö tulemusi publitseeritakse maailma juhtivates ajakirjades, mitmed meie teadlased on nende ajakirjade toimetuskolleegiumide liikmed. Populaarseteks ja jätkuvalt osavõturohketeks on kujunenud TTÜ teadlaste korraldatavad Balti Elektroonikakonverentsid. Tänavu toimus juba kaheksas konverents.

Autor tänab oma kolleege-elektroonikuid, eriti dr Harry Tani, professoreid Enn Velmret ja Toomas Rangi ning vanemteadureid Toomas Parvet ja Andres Udalit, kes lahkelt aitasid koguda faktilist informatsiooni ja graafilist materjali selle artikli jaoks.