

# AATOMKIHTSADESTAMINE – ARENGUVÕIMALUS TEHNOLOOGIALE, VÄLJAKUTSE FÜÜSIKALE

*Arnold Rosental, Jaan Aarik*

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut

*Kaupo Kukli*

Tartu Ülikooli eksperimentaalfüüsika ja tehnoloogia instituut

## TAHKISEKILED KÕRGTEHNOLOOGIAS

Tänapäeva teadus- ja tööstusaparatuur ning arvutus-, side- ja olmetehnika sisaldavad mitmesuguseid elektroonikaseadiseid ja -komponente – mikrolülitusi, mälulemente, sensoreid, kuvaekraane. Nende sõlmede töös mängivad olulist rolli õhukesed tahkisekiled. Märkimisväärsed saavutused elektroonikaseadiste ja tahkisekilede tehnoloogias viimase 10–20 aasta jooksul on andnud võimaluse infotehnoloogia tormiliseks arenguks. Keskne ülesanne mikrolülituste täiustamisel on olnud lülituskomponentide mõõtmete vähendamine lülitusel. Sellega lüüakse mitu kärbest ühe hoobiga, millest saame hea ettekujutuse mikrolülituste ühe sõlmkomponendi, transistori näite varal: kui transistori mõõtmeid ja tööpinget vähendada  $S$  korda, siis tema pindala väheneb  $S^2$  korda, signaali viivis  $S$  korda ja tarbitav võimsus  $S^3$  korda. Seega umbes 1,4-kordsel transistori mõõtmete vähenemisel, mis on juba aastaid olnud iseloomulik tehnoloogiapõlvkondade vahetusele, paranevad ülejäänud eelnimetatud parameetrid vastavalt 2, 1,4 ja 2,8 korda [Bohr, 1996]. Transistori poolt hõivatud pindala vähenemine lubab omakorda suurendada transistoride arvu mikrolülitustes ja saavutada sel teel funktsionaalvõimaluste avardamine.

Moodsad tehnoloogiad lubavad valmistada välja-transistori voolujuhtiva kanali imelühikesena, laboritingimustes rekordiliselt isegi ainult 8–10 nm pikkusena [Kawaura jt, 2000]. Et väljatransistor töötaks, peab elektrimahtuvus tema kanali ja voolu tüüriva elektroodi e paisu vahel olema piisavalt suur. Mainitud kanalipikkuse juures peab kanalit ja paisu eraldav dielektrik olema väga õhuke, ta-

gamaks vajalikku mahtuvust. Juhul, kui dielektrikuna kasutatakse traditsioonilisi väikese dielektrilise läbitavusega materjale, nagu ränidioksiid või -nitriid, ei tohiks paisudielektriku paksus ületada 1–2 nm, samal ajal kui naaberaatomite vaheline kaugus nendes dielektrikutes on 0,2–0,3 nm. Kahjuks pääseb nii õhukestes dielektrikutes mõju- le tunnelkvantefekt, mis viib dielektriliste omaduste degradeerumisele tunnelvoolu tõttu. Veelgi hullem – vaatamata kile üliõhukusele on elektrimahtuvus paisuelektroodi ja kanali vahel transistori normaalse töö tagamiseks ikkagi liiga väike. Järelikult, kasutades traditsioonilisi paisudielektrikuid, ei saa transistori mõõtmete vähendamisel üsna varsti enam edasi minna ja kogu lootus tuleb rajada uutele rakenduskõlblikele dielektrikutele, mille dielektriline läbitavus on suurem kui ränidioksiidil või -nitriidil.

Analoogse probleemiga põrkutakse kokku mikrolülitustes kasutatavate kondensaatorite mõõtmete vähendamisel. Siingi on vaja üle minna suurema dielektrilise läbitavusega dielektrikule, et oleks võimalik saada vajalikku mahtuvust elektroodi väikese pindala ja dielektriku piisavalt suure paksuse juures. Märgime, et kõrvuti uute materjalide otsinguga toimub näiteks muutmälustruktuuride mahtuvuslike omaduste parandamine mittetasapinnaliste mikrokondensaatorite tehnoloogia evitamise teel, kuna selliste kondensaatorite elektroodide pindala ja seega ka elektrimahtuvus on suurem kui sama kattealaga tasapinnalistel kondensaatoritel.

Intensiivsete otsingute tulemusena on väga perspektiivseks ränipõhiste dielektrikute asendajaks

hakatud pidama hafniumdioksiidi ( $\text{HfO}_2$ ) [Chau jt, 2005] ja/või sellel põhinevaid ühendeid. Selle materjali plussiks on tema keemiline stabiilsus räni ja germaaniumalustel. Tema baasil loodud silikaat- või nitreeritud silikaatkiled võetakse tõenäoselt kasutusele juba järgmise põlvkonna mikro- või siis juba nanoelektronikas. Loomulikult ei piirdu perspektiivsete nüüdiselektronikamaterjalide loetelu kaugeltki ainult hafniumi ühenditega. Siin ei tohi unustada titaan- ja alumiumnitiide kui barjäär- ja adhesioonikihtide ning elektrodide materjale, samuti selliseid mittetra-ditsioonilisi elektrodmetalle nagu vask, rutenium ja molübdeen. Jätkub suure dielektrilise läbitavusega materjalide otsing. Võimalike kandidaatidena mälustruktuuride jaoks on sõelale jäänud näiteks titaanoksiid ( $\text{TiO}_2$ ), tantaaloksiid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) ja nendel põhinevad ühendid.

Omaette näide õhukeste kilede rakendusvaldkondadest on pooljuht-gaasisensorid. Need seadised on sisuliselt gaasitundlikud takistid, mille funktsionaalsus on seni olnud tagatud polükristalliliste kilede kasutamise. Kilesid valmistatakse valdavalt teraliste ja poorsetena. Väljakujunenud arvamuse kohaselt töötavad redutseerivate gaaside suhtes tundlikud sensorid õhus järgmiselt: Õhuhapnik kemisorbeerub terade pinnale negatiivselt laetud ionina. Laenguülekande protsessis, mis on sorptsiooniks vajalik, vaesub terade pinnalähedane osa elektronide poolest, kui tegu on (omadefektidest tingitud)  $n$ -tüüpi (elektronjuhtivusega) pooljuhiga, näiteks laiialdaselt kasutatava tinaoksiidiga ( $\text{SnO}_2$ ), või rikastub aukude poolest, kui tegu on  $p$ -tüüpi (aukjuhtivusega) pooljuhiga, näiteks kroomoksiidiga ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). See vaesumine/rikastumine avaldab tugevat mõju sensormaterjali juhtivusele. Redutseerivate gaaside, näiteks toksilise vingugaasi ( $\text{CO}$ ) või plahvatusohtliku metaani ( $\text{CH}_4$ ), sattumisel keskkonda võib adsorbeerunud hapnikuioonide kontsentratsioon terade pinnal katalüütilise põlemise tõttu väheneda, mis annab lõpptagajärjena  $\text{SnO}_2$  juhtivuse suurenemise ja  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  juhtivuse vähenemise.

Ühelt poolt on terastruktuur sensorkilede kasulik omadus, kuna ta suurendab gaasitundlikkust; teiselt poolt tuleb teda pidada kahjulikuks, kuna ta

põhjustab koste ebastabiilsust. Seda puudust võivad aidata kõrvaldada tiheda pakkega, erijuhul epitaktsiaalsed õhukesed kiled. Niisuguste kilede kasutuselevõtu uuringud on käsile võetud mitmel pool maailmas.

#### MIS ON AATOMKIHTSADESTAMINE JA KUIDAS TA AITAB LAHENDADA NÜÜDIS-AJA KILETEHNOLOOGIA PROBLEEME

Eelpool toodud näidetest selgub, et tänapäeva kõrgtehnoloogia tähtis ülesanne on valmistada hästi kontrollitavalt õhukesi tahkisekilesid. Nende kilede paksus ei tohi mõnikord ületada kümme-konda aatomkihti. Kasvu ühtlus peab olema tagatud ka keerulise profiiliga pindadel, kaasa arvatud mikroastangud ja -vaod. Üks vähestest meetoditest, mis selle ülesande lahendamiseks suurepäraselt sobib on aatomkihtsadestamine. Meetod põhineb tõsiasi, et gaasifaasis olevate ühendite keemiline reaktsioon tahkisega võib teatud tingimustes olla iseküllastuv. Tahkisekile sünteesiks kasutatakse tavaliselt kahte või enam erinevat reagenti (lähteainet). Tingimustes, kus reagente doseeritakse üksteise järel, jättes iga doseerimispulsi vahele pausi, viiakse pinnareaktsioon iga kord küllastuseni. Pausid on vajalikud lähteainete segunemise vältimiseks gaasifaasis. Ühes sadestustsükliks, mis sisaldab kõigi vajalike reagentide pulse ja pulssidevahelisi pause, sadestub mitte rohkem kui monokiht (s.o kasvava ühendi kõiki aatomeid sisaldav tihe elementaarkiht) tahkist. Paksema kile saamiseks tuleb tsikleid vajalik arv kordi korrata. Meetodi eelis seisneb selles, et õieti valitud kasvatustingimuste juures sõltub kasvanud kihi paksus väga vähe või ei sõltu praktiliselt üldse lähteaine aururõhust gaasifaasis. Seepärast ongi võimalik valmistada ühesuguse paksusega kilesid keerulise profiiliga pindadel. Meetodi puudusteks on tahkisekile aeglane kasv ja suhteliselt ranged ja sageli ka vastuolulised nõuded lähteainetele. Sellest tulenevalt on aatomkihtsadestamise protsesside väljatöötamisel alati esmaseks eesmärgiks olnud sobivate lähteainete leidmine. Metalloksiidide aatomkihtsadestamisel on paremaid tulemusi saadud, kui metallide lähteaineteks on olnud haliidid, alküülamiidid ja alkoksiidid. Oksüdeerijaks on sa-

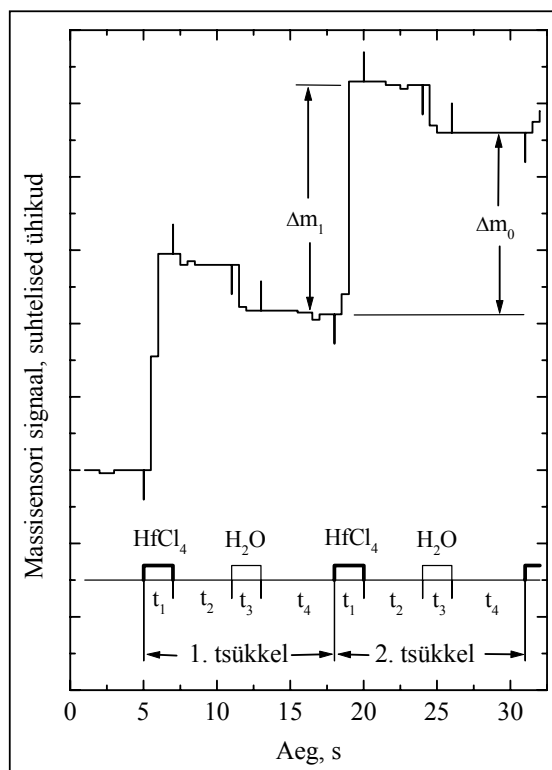
gedamini olnud veeaur, ent saab kasutada ka näiteks osooni, vesinikperoksiidi ja hapnikku.

Aatomkihtsadestamise meetodi alused töötati välja 1960ndatel ja 1970ndatel aastatel [Koltsov, Aleskovskii, 1968; Suntola, Antson, 1977]. Eestis (Tartus) rakendatakse meetodit uurimiseesmärgil alates aastast 1984. Kesksel kohal on olnud dielektrikute ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  [Aarik jt, 1990],  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  [Aarik jt, 1994],  $\text{TiO}_2$  [Aarik jt, 1995; Rosental jt, 1997],  $\text{HfO}_2$  [Aarik jt, 1999] ja  $\text{ZrO}_2$  [Kukli jt, 2001]) ja pooljuhtide ( $\text{SnO}_2$  [Rosental jt, 2003] ja  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) kasvatusmeetodite täiustamine ja saadud kilede mitmekülgne analüüs. Läbiviidud uuringute eripäraks on kvartsresonantskaalumise [Aarik jt, 1990, 1994, 1995, 1999; Kukli jt, 2001] ja optilise dielektrikpeegelduse [Rosental jt, 1997] kasutamine kilede kasvuprotsesside reaajajaliseks seireks. Esimesel juhul tugineti tuntud meetodile, mida modifitseeriti ja arendati edasi. Meetod põhineb kvartskristalli omavõnkesageduse sõltuvusel kristalli pinnale sadestunud tahkise massist. Teisel juhul töötati välja originaalne lasersondmeetod.

Kvartsresonantskaalumise signaal (joonis 1) lubab hästi iseloomustada aatomkihtsadestamise protsessi. Joonisel kujutatud kõver on saadud  $\text{HfO}_2$  kasvatamisel hafniumkloriidist ( $\text{HfCl}_4$ ) ja veeaurust ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Kasvutsükkel koosneb  $\text{HfCl}_4$  pulsist, sellele järgnevat doseerimispausist,  $\text{H}_2\text{O}$  pulsist ja teisest pausist. Iga kasvutsükli alguses on näha kvartskristalli võnkeperioodi järsk kasv kiire pinnareaktsiooni tõttu metalli lähteaine ja tahkise pinnavahe. Signaali muut on võrdeline pinnaga keemiliselt seotud kloriidi massiga. Signaali stabiliseerumine pulsi lõppedes annab märku sellest, et pinna edasine modifitseerumine on peatunud. Nagu jooniselt näha, on kvartskristalli tundlikkus piisav selleks, et tuvastada vahetusreaktsiooni tagajärjel tekkiv massi vähenemine järgneva oksüdeerimisperioodi jooksul. Olgu lisatud, et joonisel kujutatud juhul sadestub kahe tsükli jooksul umbes üks monokiht hapniku aatomeid ja sellele vastav hulk hafniumi aatomeid.

Optilisel seirel jälgitakse peegelduse muutust, millega määrab kasvuaegne pinnakihi murdumisnäitaja

muutus. Kasvu iseloomustaval signaalil, kuigi tema tekkemehhanism on teine, on ühisjooni massisignaali (joonis 2). Joonisel kujutatud kõver näitab, kuidas muutub peegeldus ühe tsükli jooksul, kui  $\text{SnO}_2$ -d kasvatatakse  $\text{SnCl}_4$  ja  $\text{H}_2\text{O}$ -st. Optilise seire iseärasuseks on võimalus hankida kasvuinfot otseselt (ilma abiobjekti kasutamata) ja laias tsüklinumbrite vahemikus alates esimesest.

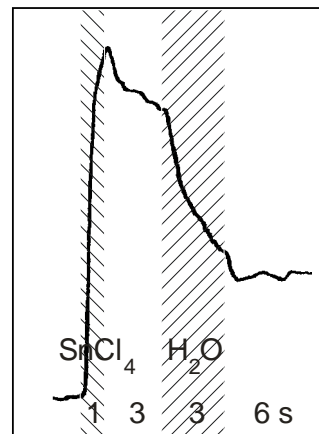


Joonis 1.

Massi muutus  $\text{HfO}_2$  aatomkihtsadestamisel  $\text{HfCl}_4$  ja  $\text{H}_2\text{O}$ -st kui protsessi spetsiifika illustreering. Pilt hõlmab kahte sadestustsükli. Iga tsükli alguses lastakse  $\text{HfCl}_4$ -l reageerida  $t_1$  jooksul kile pinnaga. Tulemuseks on adsorbeerunud vaheprodukt, mille mass on  $\Delta m_1$ . Tsükli teises pooles reageerib see produkt aja  $t_3$  jooksul  $\text{H}_2\text{O}$ -ga, andes lõpptulemuseks  $\text{HfO}_2$  massiga  $\Delta m_0$ . Iseloomulik on, et doseerimispauside  $t_2$  ja  $t_4$  ajal muutub mass väga vähe.

Ideaaljuhul peaks aatomkihtsadestamisel aset leidvate vahetusreaktsioonide tulemusel tekkima puhas kilematerjal rangelt determineeritud omaduste ja kristallstruktuuriga. Kui aga kilet ollakse sunnitud kasvatama madalatel temperatuuridel ja/või kasutades suhteliselt lühikesi tsükliäegu, jääb osa lähteainet läbi reageerimata. Tulemuseks on lisandid kiles ja tema halvenenud struktuur. Lisandite hulk sõltub kasutatud lähteainete keemilisest koostisest ja nende reaktiivsusest. Kilede defektsus võib praktilistel rakendustel tekitada tõsiseid probleeme. Võtame kas või sellise näite nagu välja-transistor. Sel juhul hajutavad paisudielektriku ja kanali vahelise piirpinna karedus ja (laetud) defektid dielektrikus kanali pinna vahetus läheduses tugevalt juhtivuslaengukandjaid, pärssides nii voolu kanalis ja vähendades transistori töökiirust. Järeldus – tuleb püüelda kilede võimalikult defektivaba kasvu poole. Sellepärast uuritaksegi intensiivselt lähteainesüsteemide ja kasvatusparameetrite (temperatuur, doseerimispulsside pikkus, reagentgaaside osarõhud jne) mõju aatomkihtsadestatud kilede-kihtide struktuurile ja puhtusele. Nii-suguse uurimistööga tegeletakse aktiivselt ka Tartu Ülikoolis.

Kilede kasvatusparameetrite optimeerimine ei piirdu ainult sellega, et leitakse režiim, mis võimaldab laboritingimustes saavutada kilede parimad omadused. Tähtis on ka tehnoloogia rakendatavus seeriatootmises. Näiteks ei pruugi lähteainesüsteemid, mis annavad vajaliku struktuuriga ja puhta kile, olla konkurentsivõimelised, kui rakendustingimusteks on kile paksuse ühtlus suurtel (läbimõõduga 300 mm ja isegi rohkem) ning ebatasastel pindadel, lähteaine mõõdukas hind või lähteaine stabiilsus pikaajalisel kasutamisel. Ja vastupidi, need lähteained, mis tagavad kilestruktuuride ühtluse ja hea reprodutseeritavuse, ei pruugi anda keemiliselt piisavalt puhtaid kilesid. Kasvatusparameetrid, mida rakendatakse laboris ja mida tahetakse rakendada tehases, võivad samuti sattuda vastuollu. Näiteks pikad kasvatusajad, mis on laboritingimustes vastuvõetavad ja annavad sageli parimate omadustega kilesid, ei tarvitse tööstuse nõuetega enam sobida. Seepärast on üheks



Joonis 2.

Astmelise dielektrikpeegelduse tsükliälteline muutus  $\text{SnO}_2$  kasvu. Näide toob esile erilise reaktsioonikineetika. Antud juhul on juurdekasv tsükli väike – ainult 0,1 monokihti.

oluliseks uurimissuunaks, millega intensiivselt tegeletakse, protsesside ökonoomsuse suurendamine.

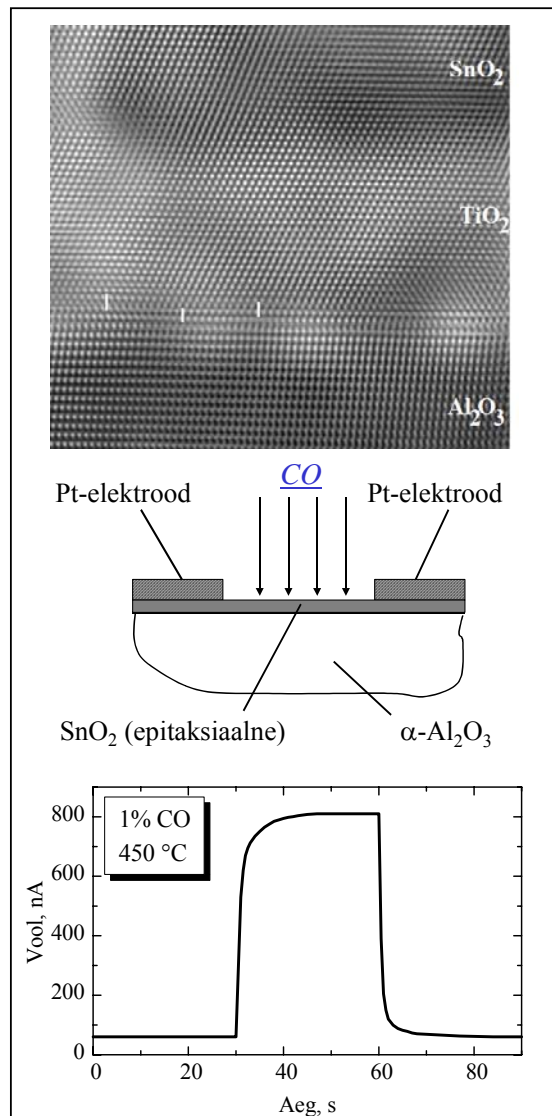
Vaatamata seni veel lahendamata küsimustele on selge, et aatomkihtsadestamisel on suur tööstuslik perspektiiv. Lisaks üliõhukeste kilede kontrollitavale ja reprodutseeritavale kasvatamisele on meetodil veel teisigi eeliseid. Näiteks lubab ta lähteainekombinatsioonide vaheldamise teel modifitseerida tahkise keemilist koostist. Muutes erinevate kombinatsioonide doseerimistsüklite proportsiooni ja kasvatustemperatuuri, võib leida tingimused eelistatult kristalliliste või amorfsete tahkete lahustete moodustamiseks. Samuti on meetodiga võimalik valmistada mitmekihilisi üliõhukestest kihtidest koosnevaid struktuure – nanolaminaate [Kukli jt, 1996]. Pooljuht-gaasisensorite töö modelleerimiseks ja uute sensorite loomiseks kuluvad ära aatomkihtsadestatud epitaktsiaalsed (joonis 3) monoteraekvivalentsed üliõhukesed kiled [Rosenthal jt, 2003]. Aatomkihtsadestamise meetodi rikka-

likud kasutusvõimalused üliõhukeste tahkisekilede valmistamisel on tingitud antud valdkonda kuuluvate teadustööde arvu märgatava kasvu viimasel paaril aastal. Ilmunud publikatsioonide analüüs [Puurunen, 2005] on näidanud, et 2004. aastal avaldati üle 400 aatomkihtsadestamise alase töö. See arv on üle kahe korra suurem kui publikatsioonide arv 2001. aastal [Puurunen, 2005]. Muuhulgas selgub kahest hiljuti ilmunud ülevaatest [Ritala, Leskelä, 2002; Puurunen, 2005], et Eesti autorid on andnud igati arvestatava panuse aatomkihtsadestamise edendamisse. Neist esimene annab viited ligikaudu 450 tööle, millest üle 40 on valminud Tartu teadlaste (kaas)autorlusel. Teisest, hilisemast leiame üle 1200 viite, kusjuures enam kui 80 töö (kaas)autoriteks on meie teadurid.

### VÄLJAKUTSED FÜÜSIKUTELE

Aatomkihtsadestamise kasutuselevõtt üliõhukeste tahkisekilede sünteesil on andnud tehnoloogidele terve rea uusi võimalusi tahkisestruktuuride konstrueerimiseks. Samas ootavad vastust mitmed lahendamata küsimused. Näiteks, kas iga aatomkihi täpsusega sünteesitud struktuur on püsiv. Või siis milline on siirdedefektide kontsentratsioon piirpindadel. Aga samuti, millised on tahkes faasis toimuvast difusioonist tingitud muutused struktuurides, kuidas toimub faaside stabiliseerumine ning millised faasisiirded realiseeruvad üliõhukestes tahkisekiledes nende valmistamisel ja eksploatatsioonil. See loetelu hõlmab ainult väikest osa küsimustest, millele otsivad vastust tehnoloogid ja elektroonikaseadiste konstruktorid. Vastuseid oodatakse füüsikalistest mõõtmistest, mis on kombineeritud teoreetilise analüüsiga. Paraku on selgunud, et paljud füüsikalised (mõõtmis)meetodid, mis töötavad suurepäraselt homogeensetel mahtobjektidel või suhteliselt paksudel (paksusega üle 10–100 nm) kiledel, ei anna usaldatavaid tulemusi õhemate kilede korral. Põhjustena võiks siin nimetada siirdekihte ja ümbritseva materjali mõju kileomadustele, aga samuti nanodimensionaalsusest tingitud kvantefekte.

Üheks oluliseks mõõtmisprobleemiks on näiteks koostise analüüs. Mitmetel tehnoloogilistel põh-



Joonis 3.

Epitaxiaalse paariskile kõrglahutus-elektronmikroskoopiline kujutis (ülal),  $\text{SnO}_2$  epitaxiaalkilega pooljuht-gaasisensori konstruktsioon (keskel) ja vool selles sensoris kostena 30-sekundilisele vingugaasi pulsile õhus (all). Ülemine pilt näitab, et meil on tegemist küllaltki täiusliku epitaksiaga – monokristallilisest safiirist ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aluse aatomite read jätkuvad peaaegu defektivabalt  $\text{TiO}_2$ -s ja  $\text{TiO}_2$ -le kristallstruktuurilt väga sarnases  $\text{SnO}_2$ -s.

justel püütakse aatomkihtsadestamist tihtipeale läbi viia suhteliselt madalatel temperatuuridel. Nagu juba märkisime, kaasneb sellega võõraatomite lisandumine kiledesse. Tehnoloogiliste protsesside optimeerimiseks tuleks nende lisandite kontsentratsiooni võimalikult täpselt mõõta. Ent juhul, kui kiled on väga õhukesed, osutuvad niisugused laialt kasutatavad mõõtmismeetodid nagu elektronsond-mikroanalüüs ja röntgenfluorestsents-spektroskoopia ebaefektiivseks. Asi on eriti hull, kui tuleb mõõta väikseid lisandikontsentratsioone. Antud probleem on osaliselt lahendatav, kui võtta tehnoloogia optimeerimiseks kasutusele spetsiaalselt selleks otstarbeks kasvatatud suhteliselt paksud kiled. Siiski ei vii selline lähenemine alati sihile, sest paljud lisandid jäävad eelistatult just kihtide (ka kile ja aluse) piirpindade lähedale. Seni pole aga leitud head lahendust sellele, kuidas määrata siirdekihtide koostist või mitmekomponendiliste materjalide koostise homogeensust mõne nanomeetri paksustes kiledes, mis on tänapäeva elektronikatööstuse huvi keskmes.

Teine suurem probleem on materjalide faasikoostis. Nimelt on polükristallistes materjalides defektide paiknemise sooduskohtadeks kristalliitide piirpinnad. Seega tuleks kilede faasikoostist täpselt tunda ja kontrollida. Kahjuks ei saa sel korral paksematel kihtidel mõõdetud tulemusi enam üldse usaldada, sest kristalliseerumisprotsessid on väga tundlikud kilede paksuse suhtes [Aarik jt, 1995, 1999; Kukli jt, 2001]. Seetõttu tuleb faasikoostise optimeerimisel analüüsida kilesid, mille paksus vastab praktikas vajalikule. Jällegi, alla 10 nm paksuste kilede faasikoostise uurimiseks pole laialt levinud struktuurianalüüsi meetodid nagu röntgendifraktsioon ja ramanspektroskoopia üldjuhul piisavalt tundlikud ja ka röntgedifraktsiooni libiseva kiire variant on rakendatav vaid teatud mõõndustega. Parimaks valikuks tuntud meetodite hulgast näib antud juhul olevat elektrondifraktsioon. Vastav seade on õnneks Tartu Ülikoolis olemas ja on siiani andnud väga väärtuslikku informatsiooni üliõhukestes tahkisekiledes toimivate kristallisatsiooniprotsesside kohta [Aarik jt, 1995, 1999; Kukli jt, 2001; Rosental jt, 2003]. Sa-

mas on andmeid elektronkiire toimel aset leidvate koostise muutuste [McCartney, Smith, 1991; Uustare jt, 1994] ja faasisiirete [McCarney, Smith, 1991] kohta. Seepärast ei saa alati olla kindel, et elektrondifraktsiooni mõõtmised ise struktuuri ei mõjuta, eriti juhtudel, kui uuritavad materjalikogused on väga väikesed. Seega oleks alternatiivsete ruumilise kõrglahutusega struktuurianalüüsi meetodite edasine arendamine väga oluline.

Kolmas oluline probleem on defektid. Lisandid ning kihtide ja kristalliitide piirpinnad on defektide allikaks, kusjuures defektide poolt indutseeritud laengulõksude tihedus näiteks dielektriku ja ränialuse kontaktpinnal võib ulatuda suurusjärkude  $10^{12}$ – $10^{13}$   $eV^{-1}cm^{-2}$ . Praktilisi rakendusi silmas pidades tekitab laengute lõksustumine defektidel tuntavaid probleeme, millest mõningaid on eespool nimetatud. Nende probleemide lahendamiseks tuleks eelkõige teada, kuidas paiknevad defektid, st milline osa nendest paikneb tahkisekile ja temaga piirneva materjali piirpinnal ja milline osa kile sisemuses. Samuti oleks vaja teada defektide ja laengukandjate vastasmõju energetilisi parameetreid, näiteks seda, millist energiat on vaja laengukandjate vabastamiseks defektidega seotud lõksudelt. Niisugust infot võib saada elektrilistest mõõtmistest [Dueñas jt, 2005]. Samas on teada, et ka optiline spektroskoopia võib anda infot laengulõksude kohta. Siiski ei ole seda laadi optilised meetodid leidnud eriti tõhusat rakendust üliõhukeste kilede uurimisel. Ometi võiks sellel alal ehk juba lähitulevikus nii mõndagi ära teha, eriti kui kombineerida optilistel mõõtmistel saadud andmeid elektriliste ja elektronspektroskoopiliste mõõtmiste tulemustega.

Kokkuvõtteks võiks öelda, et aatomkihtsadestamise meetod, võimaldades kontrollitavalt valmistada kilestruktuure, milles ühe kile paksus on ainult mõne aatomkihi suurusjärgus, võiks lahendada mitmeid mikroelektronika arengut pidurdavaid probleeme. Samas nõuab meetod ise veel edasiarendamist, et selle rakendamine saaks muuttuda massiliseks. Tehnoloogiliseks arendustöök on omakorda vaja adekvaatset infot valmistatud tahkisekilede omaduste kohta. Niisuguse info saa-

mine on osutunud aga komplitseerituks juhtudel, kui on tegemist tahkisekihtidega, mille paksus on nanomeetri suurusjärgus. Seetõttu on tekkinud ka tõsine vajadus sobivate füüsikaliste mõõtmismeetodite edasiarendamise järele ja tahaks loota, et sellesse töösse annavad oma tõhusa panuse ka Eesti füüsikud.

#### VIITEID

- Aarik, J., Aidla, A., Jaek, A., Kiisler, A.-A., Tammi, A.-A. 1990. Properties of amorphous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films grown by ALE. *Acta Polytech. Scand. Chem. Technol. Ser.*, 195, 201-208.
- Aarik, J., Aidla, A., Kiisler, A.-A., Uustare, T., Sammelselg, V. 1999. Influence of substrate temperature on atomic layer growth and properties of  $\text{HfO}_2$  thin films. *Thin Solid Films*, 340, 110-116.
- Aarik, J., Aidla, A., Kukli, K., Uustare, T. 1994. Deposition and etching of tantalum oxide films in atomic layer epitaxy process. *J. Cryst. Growth*, 144, 116-119.
- Aarik, J., Aidla, A., Uustare, T., V. Sammelselg, V. 1995. Morphology and structure of  $\text{TiO}_2$  thin films grown by atomic layer deposition. *J. Cryst. Growth*, 148, 268-275.
- Bohr, M. T. 1996. Technology development strategies for the 21st century. *Appl. Surf. Sci.*, 100-101, 534-540.
- Chau, R., Brask, J., Datta, S., Dewey, G., Doczy, M., Doyle, B., Kavalieros, J., Jin, B., Metz, M., Majumdar, A., Radosavljevic, M. 2005. Application of high- $\kappa$  gate dielectrics and metal gate electrodes to enable silicon and non-silicon logic nanotechnology. *Microelectr. Eng.*, 80, 1-6.
- Dueñas, S., Castán, H., García, H., Barbolla, J., Kukli, K., Aarik, J. 2005. Effect of growth temperature and postmetallization annealing on the interface and dielectric quality of atomic layer deposited  $\text{HfO}_2$  on *p* and *n* silicon. *J. Appl. Phys.*, 96, 1365-1372.
- Kawaura, H., Sakamoto, T., Bara, T. 2000. Observation of source-to-drain direct tunneling current in 8 nm gate electrically variable shallow junction metal-oxide-semiconductor field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett.*, 76, 3810-3812.
- Kol'tsov, S. I., Aleskovskii, V. B. 1968. Effect of degree of dehydration of silica gel on mechanism of hydrolysis of adsorbed titanium tetrachloride. *Russian J. Phys. Chem.*, 42, 630-632.
- Kukli, K., Forsgren, K., Aarik, J., Uustare, T., Aidla, A., Niskanen, A., Ritala, M., Leskelä, M., Härsta, A. 2001. Atomic layer deposition of zirconium oxide from zirconium tetraiodide, water and hydrogen peroxide. *J. Cryst. Growth*, 231, 262-272.
- Kukli, K., Ihanus, J., Ritala, M., Leskelä, M. 1996. Tailoring the dielectric properties of  $\text{HfO}_2$ - $\text{Ta}_2\text{O}_5$  nanolaminates. *Appl. Phys. Lett.*, 68, 3737-3739.
- McCartney, M. R., Smith, D. J. 1991. Studies of electron irradiation and annealing effects on  $\text{TiO}_2$  surfaces in ultrahigh vacuum using high-resolution electron microscopy. *Surf. Sci.*, 250, 169-178.
- Puurunen, R. 2005. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethyl-aluminum/water process. *J. Appl. Phys.*, 97, 121301-1-52.
- Ritala, M., Leskelä, M. 2002. Atomic layer deposition. Nalwa, H. S. (ed.). *Handbook of Thin Film Materials*, Academic Press, Vol. 1: Deposition and Processing of Thin Films, 103-159.
- Rosental, A., Adamson, P., Gerst, A., Koppel, H., Tarre, A. 1997. Atomic layer deposition in traveling-wave reactor: In situ diagnostics by optical reflection. *Appl. Surf. Sci.*, 112, 82-86.
- Rosental, A., Tarre, A., Gerst, A., Sundqvist, J., Härsta, A., Aidla, A., Aarik, J., Sammelselg, V., Uustare, T. 2003. Gas sensing properties of epitaxial  $\text{SnO}_2$  thin films prepared by atomic layer deposition. *Sens. Actuators B*, 93, 552-555.
- Suntola, T., Antson, J. 1977. Method for producing compound thin films. U.S. Patent No. 4058430, 1-9.
- Uustare, T., Aarik, J., Elango, M. 1994. Oxygen depletion of the crystalline (anatase)  $\text{TiO}_2$  initiated by ionization of the *K* shell. *Appl. Phys. Lett.*, 65, 2551-2552.