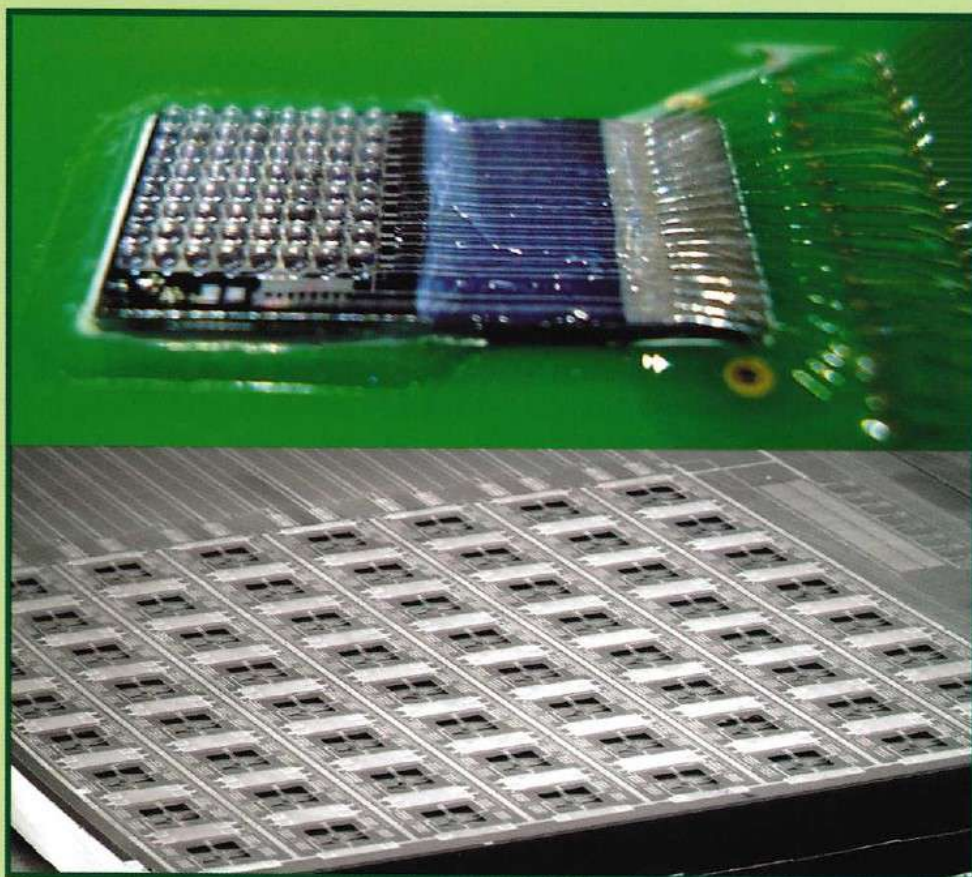


híradástechnika

1945 VOLUME LXII. 2007

hírközlés ■ informatika



**Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
kutatási eredményeiből**

2007/10

**A Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület folyóirata
a Nemzeti Hírközlési és Informatikai Tanács együttműködésével**

Tartalom

<i>VERSENYKÉPES TUDOMÁNY – 50 ÉVES AZ MTA MŰSZAKI FIZIKAI ÉS ANYAGTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET</i>	1
Menyhárd Miklós, Gergely György Auger elektron spektroszkópia (AES) alkalmazása híradás- és vákuumtechnikai alkatrészek vizsgálatánál	2
Dobos László, Gergely György, Mojzes Imre, Szigethy Dezső Az illékonykomponens-analízis (EGA) alkalmazása A ^{III} -B ^V félvezető eszközök technológiájában	6
Rakovics Vilmos, Püspöki Sándor, Serényi Miklós, Réti István, Balázs János, Bársony István GaInAsP/InP infravörös diódák és lézerek	12
Riesz Ferenc, Lukács István Endre, Szabó János, Makai János, Laczik Zsolt, Pődör Bálint, Réti István, Szentpáli Béla, Eördögh Imre Makyoh-topográfia: egy egyszerű és hatékony eljárás félvezető szeletek simaságának vizsgálatára	19
Kuthi Edvárd, Pintér István, Mohácsy Tibor, Ádám Antalné, Szentpáli Béla, Bársony István PIII napelemek beltéri alkalmazása	25
Németh Ágoston, Lábadi Zoltán, Bársony István Napelemtechnológiai Innovációs Centrum az MTA MFA-ban	30
Szentpáli Béla Termisztorok és bolométerek zajhatárolt érzékenysége	35
Basa Péter, Horváth Zsolt József, Jászi Tamás, Molnár György, Pap Andrea Edit, Dobos László, Tóth Lajos, Pécz Béla Nem-illékony nanokristályos félvezető memóriák	43
Vásárhelyi Gábor, Kis Attila, Ádám Antalné, Dücső Csaba, Bársony István Tapintásérzékelő tömbök – tervezés és jelfeldolgozás	47
HTE-hírek Gordos Géza 70 éves Pap László a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja	53

*Borító: Szilikon „bőrfelülettel” borított szerelt ujjbegy (fent),
és az MFA-ban készült 8x8 elemes integrált tapintásérzékelő chip elektronmikroszkópos felvétele (lent)*

Védnökök

SALLAI GYULA a HTE elnöke és DETREKŐI ÁKOS az NHIT elnöke

Főszerkesztő

SZABÓ CSABA ATTILA

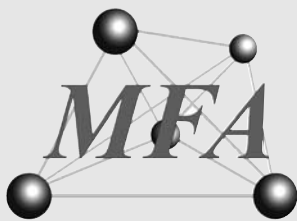
Szerkesztőbizottság

Elnök: ZOMBORY LÁSZLÓ

BARTOLITS ISTVÁN
BÁRSONY ISTVÁN
BUTTYÁN LEVENTE
GYÓRI ERZSÉBET

IMRE SÁNDOR
KÁNTOR CSABA
LOIS LÁSZLÓ
NÉMETH GÉZA
PAKSY GÉZA

PRAZSÁK GERGŐ
TÉTÉNYI ISTVÁN
VESZELY GYULA
VONDERVISZT LAJOS



Versenyképes tudomány – 50 éves az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

{barsony, horvzsj}@mfa.kfki.hu

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet 2007. októberében ünnepli jogelődje, az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézete alapításának 50. évfordulóját. Ez egybeesik az MTA intézethálózati konszolidáció során a másik jogelőddel, a KFKI Anyagtudományi Kutató Intézettel végrehajtott egyesítés 10. évfordulójával. A Híradástechnika Szerkesztősége az októberi kiadásban ebből az alkalomból biztosított lehetőséget az intézet kutatói számára ahhoz, hogy a különszám keretében néhány múltbeli és aktuális kutatási téma ismertetésével felvillantsák az intézménynek elsősorban az elektronikai szerkezetek, mikrotechnológiai, fényemittáló és fotovoltaiikus eszközök fejlesztése terén elért eredményeit.

A félévszázados jubileum alkalmából tisztelgünk az alapítók bölcsessége, az elődök távolbalátása, a volt és jelenlegi munkatársak nagyszerű tudományos és emberi teljesítménye előtt, melyet az elődök vállán állva értek el. Az intézet által művelt műszaki, illetve alkalmazott fizikát és anyagtudományt az elmúlt 50 évben sikerült az alapítók előrelátó szándéka szerint a gazdaság, az ipar szolgálatába állítani oly módon, hogy az eredeti ötleteken alapuló termékekben megnyilvánuló magyar kreativitás az egész hazai tudományos élet nemzetközi hírnevét is öregbítette. Az intézet mindkét elődje, az MTA MFKI és a KFKI MKI majd ATKI révén nélkülözhetetlen kutatási háttérrel adta az elmúlt öt évtized során a szebb napokat látott hazai elektronikai alkatrésziparnak, beleértve a világítástechnikai eszközöktől a mágneses buboréktárolók, a szilícium és vegyület-félvezető szerkezetek és eszközök kutatásán át az integrált áramköri és érzékelőgyártásig terjedő teljes spektrumot.

Mára a hazai ipar és vele együtt ez az igény is – a költségvetési kutatástámogatással egyetemben – igen csak megcsappant. Fordulópontot jelentett ebből a szempontból az intézet jogelődjének szomszédságában, az Újpesten működő Mikroelektronikai Vállalat IC gyártóbázisának 1986-os szerencsétlen tűzkatasztrófája. Akkoriban még nem sejtettük, hogy a lángokban tulajdonképpen az egész magyar mikroelektronikai gyártás és ezzel együtt a nemzetközi K+F együttműködésbe történő aktív bekapcsolódásunk esélye is évtizedekre elhamvadt.

Az 1998-as intézetegyesítés a megmaradt erőforrások, szakembergárda, kutatási tapasztalat és eszköz-bázis kényszerű összevonásával némileg jobb kiindulási alapot biztosított ahhoz, hogy korszerűbb, perspektivikusabb és főként finanszírozható kutatás-fejlesztési

témák szolgálatába állíthassuk az anyagtudomány műveléséhez elengedhetetlen preparatív és analitikai hátterünket. Így alakult ki a csillebércei telephelyen az unikális szilícium-technológiai tisztaszoba-laboratórium körül az a milliárdos értékű mikrotechnológiai infrastruktúra, ami hazánkban egyedül teszi lehetővé a félvezető technológia művelését, azaz integrált mikro- és nanorendszerek előállítását. Ez meglehetősen kétes dicsőség, hisz a 75 mm átmérőjű szeletek megmunkálására alkalmas műveleti sor berendezései jobbra a 80-as évek végének, 90-es évek elejének technológiai szintjét képviselik, melyek egy-egy korszerűbb készülék beiktatásával mégis megfelelően bizonyultak az elmúlt 15 évben kifejlődött mikro-elektromechanikai (MEMS) rendszerek, speciális detektor- és fényemittáló eszközök kutatás-fejlesztésére.

A fotovoltaiikus eszközök technológiai bázisa viszont a legutóbbi években örömdetesesen fejlődött. A nanométerek tartományába eső, egyre bonyolultabb alacsony-dimenziós szerkezetek kutatása nem folyhatna az MFA-ban működő, nagy hagyományokra épülő és folyamatosan korszerűsített, kiváló elektronsugaras, ionsugaras és Röntgen-analitika, az elektronmikroszkópos, pásztázószondás, spektroellipszometriás, egyéb optikai és elektromos karakterizációs módszerek széleskörű alkalmazása nélkül. Némely speciális probléma kezelésében helyelközzel ma is értékes, sőt nélkülözhetetlen kutatási partnerré válhatunk nemzetközi programokban is.

Hogy ez a „tudomány” versenyképesnek bizonyul-e a hazai döntéshozók szemében, azaz „mint közfeladat” érdemesül-e állami támogatásra az „adófizetők pénzéből”, azt a közeljövő dönti el. Mi nyugodt lelkiismerettel állítjuk, hogy – a rendelkezésre álló eszközökkel az adott körülmények között megfelelően sáfárkodva – kiváló tudósgenerációknak biztosítottuk a munkafeltételeket a nyugodt alkotáshoz és a kutatói utánpótlás neveléséhez. Egyik szemünket állandóan a gyakorlat, a gazdaság igényein tartva magas színvonalú, nemzetközi összehasonlításban is „versenyképes” alap- és alkalmazott kutatási eredmények megszületését igyekeztünk szolgálni, ezek hasznosítása, hasznosulása viszont már aligha kérhető számon rajtunk.

Az összeállításban szereplő cikkek – a teljesség igénye nélkül – az elmúlt évtizedek eredményeiből nyújtanak válogatást a Híradástechnika olvasói számára.

Bársony István és Horváth Zsolt József
MTA-MFA, vendégszerkesztők

Auger elektron spektroszkópia alkalmazása híradás- és vákuumtechnikai alkatrészek vizsgálatánál

MENYHÁRD MIKLÓS, GERGELY GYÖRGY

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
menyhard@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: AES mélységi feltérképezés, vékonyréteg ellenállások, GMR, volfrám

Az MTA MFA felületfizikai kutatásait (utóbbi negyven év) foglaljuk röviden össze a híradástechnikai anyagok szempontjából. Megmutatjuk, hogy a felületelemzés AES-sel és a mélységi feltérképezés az kezdeti egyszerűbb formájában is értékes információkat adott a vékonyréteg ellenállások oxidációs folyamatairól, míg az általunk bevezetett fejlettebb változata (minta forgatás, illetve sűrűlódó beesésű, kis energiájú ionbombázás) nm-es mélységi felbontást tesz lehetővé, ami már alkalmas GMR rétegek vizsgálatára. A volfrámkutatásokat és felületfizika kapcsolatát külön fejezetben tárgyaljuk.

1. Bevezetés

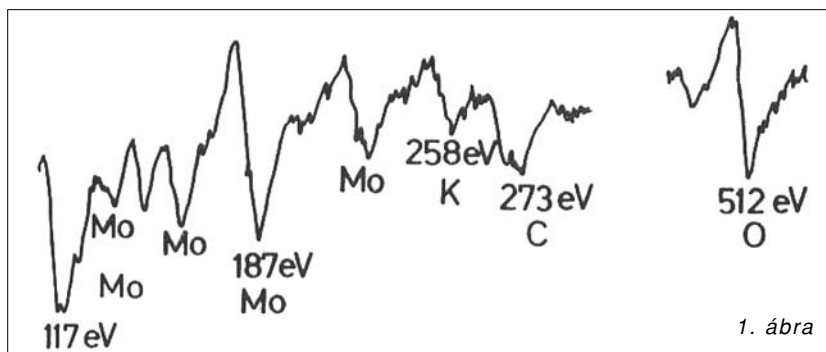
Az Auger elektron spektroszkópiával (AES) [1] meg tudjuk határozni a felület 1-3 atomi rétege vastag tartományának összetételét. Mivel egyszerű és viszonylag nem túlságosan költséges, talán a legelterjedtebb felület analitikai módszer. A fizikai paraméterek (információs mélység, gerjesztési hatáskeresztmetszetek, Auger visszaszórási tényező stb.) ismerete mellett a spektrumok kiértékelése sem túlságosan bonyolult. A paraméterek meghatározásának hatékony eszköze az MFKI-ban kifejlesztett rugalmas elektronszórás spektrometria (EPES) [2], az AES egyik kiegészítő módszere.

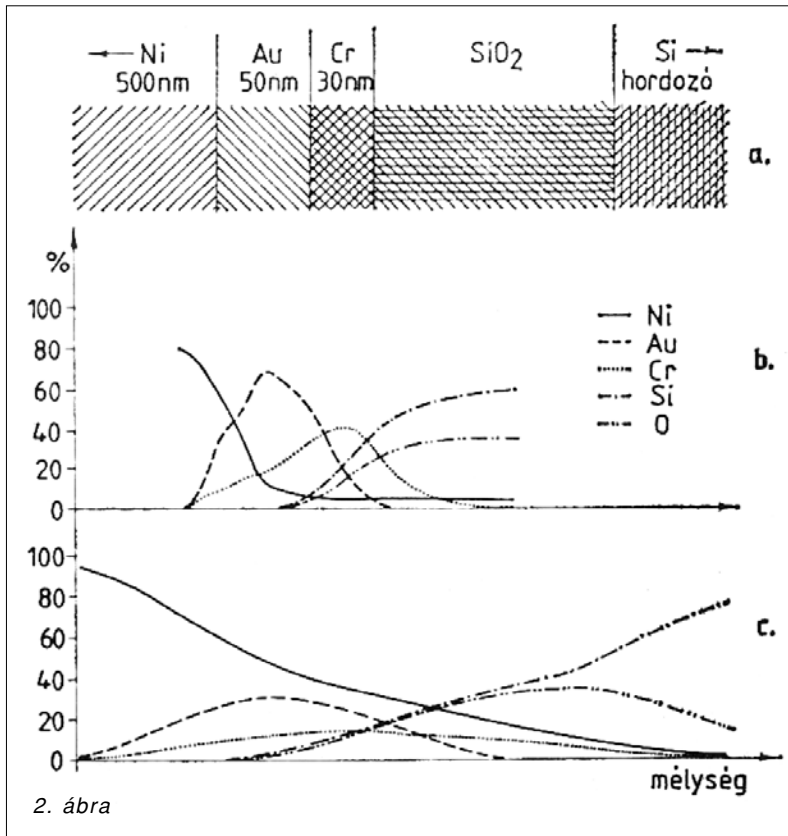
A módszer Harris 1968-as AES közleménye után indult viharos fejlődésnek [1]. Az MFKI-ban felismerve, hogy a jövőben a felületanalitika alapvető fontosságú lesz, a legváltozatosabb területeken törekedtünk az AES mielőbbi megvalósítására. Első lépésként a Vacuum Generators (VG) gyártmányú LEED berendezésünket bővítettük úgy, hogy AES spektrumok felvételére is alkalmas lett. Ez 1973-ban történt, amikor is ez lett az első Auger spektrométer hazánkban [3]. A hengeres tükör analizátort (CMA) alkalmazó Riber OPC 103 spektrométert, aminek energia-felbontása sokkal jobb, mint LEED-ből átalakított fékezőrácsos spektrométeré, 1977-ban állítottuk üzembe. Ekkor már világos volt, hogy az Auger fraktográfia, ami a tört felületek AES analízisét jelenti, igen jól alkalmazható fémkutatásban. Ehhez természetesen be kellett szerezni UHV-ben működő törőszerszámot (a törés cseppfolyós N_2 hőmérsékleten történik), ami a tört felületek in-situ AES vizsgálatát teszi lehetővé. Az akkori deviza nehézségek miatt az UHV mérőkamrát a Tungsram Kutató építette meg. A teljes elektronikát a KFKI (Tóth Ferenc) készítette el, a KFKI NV-255 szinkron detektorát alkalmaztuk a derivált üzemmódban [4]. Emellett megépítettük az analóg üzemmódra alkalmas detektort is [5].

Rövidesen az AES egyik fő alkalmazási területe vékonyrétegek és multirétegek mélységi elemzése lett. Ennek elve egyszerű; Ar^+ ionbombázással a paraméterek kedvező beállításával (ionáram, energia, beesési szög) szabályozott vastagságú rétegeket lehet lehántolni a mintáról, melynek felületét AES-sel elemzik. Így az idő függvényében az AES a minta mélységi összetételét adja [6]. Az ionbombázás az anyageltávolításon túl roncsolja és így megváltoztatja a mérendő mintát. A módszer eredeti változatában a roncsolódás mértéke függ az eltávolított anyag mennyiségétől és így a vizsgálható vastagság korlátozva volt. Ezen segített az A. Zalar által bevezetett mintaforgatás [7]. Ezt a módszert valószínűsítettük meg Barna Árpád segítségével először ex-situ [8] majd in-situ módon. Tovább javítja a mérés mélységi felbontását a sűrűlódó beesésű ionbombázás és a alacsony ionenergia használata, amit szintén Barna Árpád valósított meg. Az általa épített kisenergiájú ionágyúval (amit egy magyar vállalkozás, a Technoorg Linda gyárt) 1-2 nm-es mélységi feloldást valósítottunk meg.

2. AES vizsgálatok híradástechnikai anyagokkal

Az első AES vizsgálatokat W huzal felületén, tűzjelző fotócellák Mo fotókatódján (Tungsram Kutató), továbbá Si oxid és nitrid rétegeken (HIKI) végeztük [8]





A feladatok által megkövetelt módon folyamatosan fejlesztettük az AES kiértékelési eljárásokat. Például a fenti vizsgálatoknál először az r_B Auger visszaszórási tényezőt a Shimizu képlettel számítottuk, később saját kutatási eredményünkből vettük [9].

Az 1. ábra a Mo fotókatód spektrumában K, C és O-t mutat, ami a fotókatód nem kívánt szennyezése. A spektrumot derivált üzemmódban vettük fel.

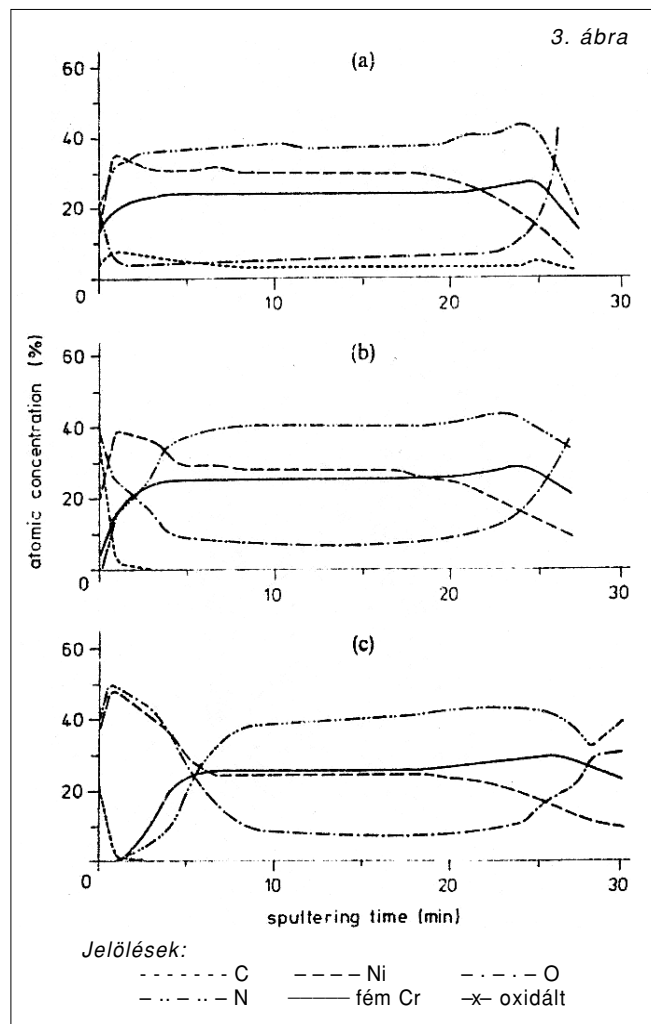
A 2. ábrán az AES mélységi feltérképezés egy korai alkalmazását mutatjuk Si félvezető kristály felületén kialakított többrétegű kontaktus esetén. A 2/a. ábra a minta felépítését mutatja. A 2/c. ábrán a hagyományosan felvett (nem forgatott minta 3 keV ion energia) mélységi profilt mutatjuk; a rétegszerkezet szinte nem látszik. Ha a vastag Ni réteg egy részét úgy távolítjuk el, hogy ionbombázás közben forgatjuk a mintát, akkor a profil minősége jelentősen megjavul, 2/b. ábra [8], de a rétegek közötti átmenetek még mindig jelentősen szélesebbek, mint amit az elektronmikroszkópos kép alapján várunk. Ezért volt szükség a módszer fent említett további fejlesztésére.

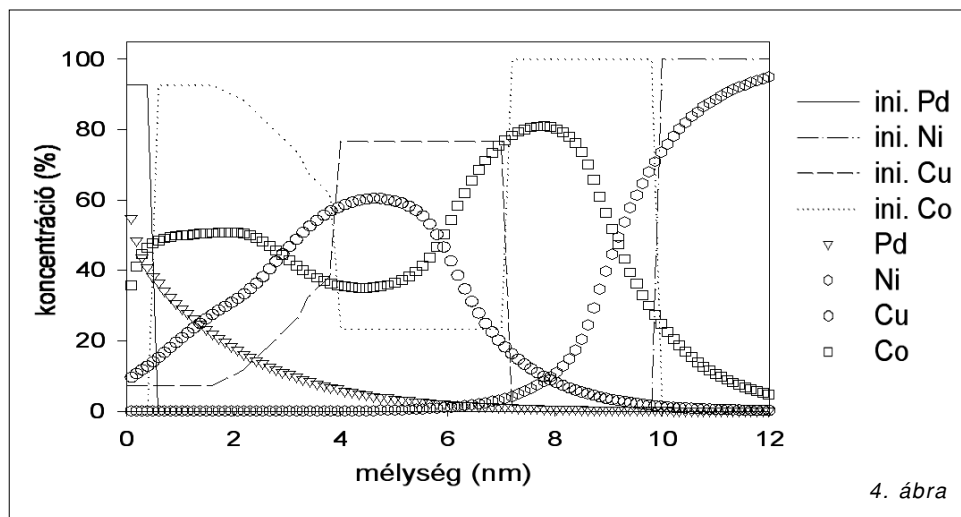
Érdekes módon a módszer még ebben a viszonylag fejletlen állapotában is értékes eredményeket adott. 50%Ni-50%Cr rádiófrekvenciás porlasztással készített vékonyréteg ellenállások rétegszerkezetének hőkezelés hatására történő változását vizsgáltunk AES mélységi feltérképezéssel [10]. Megmutattuk, hogy a hőkezelés hatására a felületi rétegben feldúsul a Cr_2O_3 és annak hosszával az oxid réteg vastagsága nőtt. Az AES mélységi elemzést hőkezelés előtt (3/a. ábra), 563 K 6 órás (3/b. ábra) és 100 órás hőkezelés után végeztük (3/c. ábra).

Hasonló vizsgálatokat végeztünk Ta alapú vékonyréteg ellenállások hőkezelésénél [11], ahol az AES mélységi elemzés hasonló oxidálási folyamatokat tárt fel.

A merevlemezek olvasófejében lévő alkalmazott óriási mágneses ellenállású (GMR) rétegszerkezet van. Az óriási mágneses ellenállást a Co/Cu/Co rétegek adják. Ezeknek tipikus vastagsága 1 (Co illetve 2,3 (Cu) nm, azaz a Co réteg mindössze öt atomi réteg vastag. Ilyen méreteknél alapvető fontosságú tudni, hogy a határfelület hogyan néz ki. Egy modellkísérletben ilyen réteget rendszert növesztettünk, amit AES mélységi feltérképezéssel vizsgáltunk.

Az eredményt a 4. ábra mutatja, a következő oldalon. Az ábrán feltüntettük a mért koncentráció-eloszlásokat és az azokból származtatható eredeti (ini.) koncentráció eloszlásokat. A megdöbbentő eredmény az volt, hogy a Co/Cu határfelület elkent, míg a Cu/Co határfelület éles [12]. Működőképes GMR rétegek készítésekor ezért a két határfelület készítésekor más technológiát kell alkalmazni.





4. ábra

3. Auger elektron spektroszkópia a volfrámkutatásban

Külön fejezetet szentelünk a volfrám AES vizsgálatainak. A W az izzólámpákban az izzószál anyaga, de a fénycsövek, színes TV képcsövek és a teljesítmény elektroncsövek katódjaként ma is különösen fontos. Az MFKI a hazai W kutatásokban jelentős tudományos eredményeket ért el.

Teljesen nyilvánvaló volt, hogy az Intézetben frissen bevezetett AES-t próbáljuk alkalmazni az Intézet tradicionálisan művelt volfrámkutatásban. Csak érdekességgé említjük meg, hogy a Harris által a GE-ben épített első LEED-re alapozott rácsos AES első vizsgálata éppen volfrámszálon történt; a felületi szegregációt vizsgálta.

Mi két kérdéskörhöz kívántuk az AES vizsgálatokkal hozzászólni; az igen izgalmas és akkor még részben nyitott káliumfázisok kérdéséhez (amik alapvetők a megfelelő csúszási szilárdság eléréséhez), és hogy a szemcsehatárokon jelenlévő szennyezők befolyásolhatják-e a szemcsehatárok mechanikai tulajdonságait.

A káliumvizsgálatokhoz elsőként hazánkban és akkor az egész szocialista táborban mi alkalmaztuk az AES fraktográfiát. A módszer az AES igen jó felületi érzékenysége épül és az AES készülék fejlesztésének a legfőbb indoka volt. Azon alapul, hogyha egy anyag egy kitüntetett felület mentén törlik, akkor ennek a felületnek a kémiai analízise AES-sel kényelmesen elvégezhető. Itt azt kell hangsúlyozni, hogy egy normál polikristályos fémekben a szemcsehatárok koncentrációja 1 ppm alatt van, tehát ha ezeket 100% idegen anyag fedi be, akkor ennek az anyagnak a mennyisége kisebb 1 ppm-nél, ami térfogatanalízissel alig észlelhető, viszont az adott elrendezésben a fém tulajdonságait a szegregált anyag határozhatja meg.

Az irodalom azt találta, hogy a volfrám tört felületén mindig van kálium. Ez a megállapítás ellentmondott a kálium-volfrám rendszerről kialakult tudásunknak. Vizsgálataink az utóbbit támasztották alá. Azt sikerült ugyanis megmutatnunk, ami akkor AES fraktográfiában is újnak számított, hogy a kétségtelenül helyes AES vizsgálatok interpretációjában van a hiba.

Ugyanis ahogyan azt korábban említettük, a módszer azt feltételezi, hogy az AES-sel a felületen talált anyag az, ami ott volt a törés előtt is. Ez sok esetben igaz is, de nem az igen speciális volfrám-kálium rendszer esetében. Itt ugyanis egy igen furcsa helyzetben vagyunk. A kálium, ahogy ezt az MFKI volfrám-kutatói jól tudták, az újrakristályosodott huzalban, buborékokban található. Másoldalról viszont azt jól tudtuk, hogy a kálium a volfrám felületéhez

egy atomos rétegben igen erősen kötődik, hiszen a kilépési munkát elektronvoltokkal csökkentti. Ezért ha a huzal törésekor egy káliumbuborék kinyílik, az abból származó kálium még szobahőmérsékleten is igen gyorsan diffundálva betérítheti a felületet.

Ezt mutattuk meg úgy, hogy a káliumbuborékok mennyiségét változtattuk hőkezeléssel és az elképzéseknek megfelelően ekkor a tört felületeken kialakuló fedettség a hőkezeléssel, azaz a buborékok számával változott. Ezen vizsgálatok során azt is megmutattuk, hogy a huzalban igen alacsony hőkezelés után még két-dimenziós elterült káliumfázis is található. Ezek a vizsgálatok az [13,14] közleményekben ismertették.

További izgalmas téma a volfrám területen: ellenállásmérésekkel megállapították (Gaál, Uray és munkatársai), hogy újrakristályosodás során az oldott vas mennyisége csökken a volfrámban. Mivel a szennyező vas kipárolgáshoz a hőmérséklet túl alacsony, ezért az oldott vas csökkenésének magyarázatához más mechanizmust kellett keresni. Felvetődött, hogy a szemcsehatáron gyűlhetnek fel a hiányzó oldott anyagok. A hőmérséklet azonban a szokásos szegregációhoz alacsony, azaz diffúzióval az oldott anyag nem kerülhet a szemcsehatárokra.

A volfrám újrakristályosodásakor azonban a szemcsehatárok igen nagy területeket „sepernek” át. Elképzelhető, hogy a szemcsehatár szegregáció nem a szokásos módon történik, azaz nem az oldott anyag megy a szemcsehatárhoz, hanem a szemcsehatár mozgása során „felveszi” az oldott anyagot. Ennek a modellnek a következménye, hogy elhanyagolható diffúzió esetén is kialakulhat szemcsehatár szegregáció [15-20].

A 70-es években az intézetben kezdődött alap- és alkalmazott kutatások alapozták meg azt az MFKI-TUNGSRAM ipari-kutatói együttműködést, amit a jogutódok, az MFA és a GE, máig intenzíven folytatnak. Ennek keretében legutóbb a tóriumoxiddal adalékolt huzalokat vizsgálva megállapítottuk, hogy a mátrixban lévő tóriumoxid nem képes a szál felületén olyan tórium fedettséget létrehozni ami a begyújtást a lámpa későbbi életében elősegíti [21].

Irodalom

- [1] Gergely Gy.,
Szekundéremissziós spektrometria, AES, SEES, ELS.
A szilárdtestkutatás újabb eredményei 6.
Akadémiai Kiadó (1979), pp.107–274.
- [2] Gergely Gy.,
25 éves a rugalmas elektronszórás spektrometria.
Fizikai Szemle, 2006/11.
- [3] Gergely Gy., Menyhárd M., Németh K.,
Az elektronspektroszkópia alkalmazása
a felületvizsgálatoknál.
A szilárdtestkutatás korszerű berendezései.
GTE Konferencia, Budapest (1973), p.21.
- [4] Gergely Gy.,
Auger továbbá SIMS spektrométerek megépítése
hazai erőforrásokra támaszkodva, vékonyréteg és
felületi analitikai vizsgálatok céljára.
Finommechanika-Mikrotechnika 22. (1983), p.60.
- [5] Gergely Menyhárd M.,
Auger elektronspektroszkópia,
MFKI'77 Évkönyv, p.151.
- [6] Menyhárd M.,
Mélyégi feltérképezés Auger elektronspektroszkópiával
Fizikai Szemle, 2004/6., p.177.
- [7] A. Zalar,
Thin Solid Films 124, 223. (1985).
- [8] Gergely Gy., Sulyok A., Barna Á.,
Szekundéremissziós spektroszkópia alkalmazásai
fémek felületelemzésénél.
Csepeli Műszaki Gazdasági Szemle, 1988/2., p.3.
- [9] G. Gergely, B. Gruzza, M. Menyhárd,
Cannes: Backscattering spectra of medium energy
electrons. Le Vide, les Couches Minces,
No.201, (1980), p.1392.
- [10] Koltai, O. Geszti, M. Menyhárd,
The effect of nitrogen doping on properties of
thin 50%Ni-50%Cr films,
Thin Solid Films 16. (1984), p.221.
- [11] V.P. Kolonits, M. Czermann, O. Geszti, M. Menyhárd,
The oxidation of Tantalum based thin films.
Thin Solid Films, 123. (1985), p.45.
- [12] M. Menyhárd, G. Zsolt, P.J. Chen, C.J. Powell,
R.D. McMichael, W.F. Egelhoff, Jr.,
Structural effects in the growth of
Giant Magnetoresistance (GMR) spin valves.
Appl. Surf. Sci. 180 (2001), p.315.
- [13] A. Kele, M. Menyhárd, L. Uray, I. Gaal,
State of bonding and distribution of impurities
in K-Al-Si doped tungsten wires. Planseeber.
Pulvermetallurgie 26 (1978), p.3.
- [14] M. Menyhárd,
Potassium on the fracture surface of tungsten wires
studied by AES,
Surface and Interface Analysis 1 (1979), p.175.
- [15] M. Menyhárd,
Investigation of tungsten wire by AES,
Proc. of „Surface Analysis'79”, Karlovy Vary 1979.
(ed. D. Stulik), Vol.2, p.38.
- [16] Gergely Gy., Menyhárd M.,
Auger spektrometriai vizsgálatok fémek törési
felületén. Hazai kutatóintézetekben kifejlesztett
mérési módszerek és mérőeszközök.
(szerk.: Groma G. et al.),
METESZ-ELFT, (1980), p.113.
- [17] A. Kele, M. Menyhárd,
On the fracture of doped tungsten,
Acta Physica Hungarica 49 (1980), p.127.
- [18] M. Menyhárd,
On the fracture of doped tungsten; an AES study.
Proc. of 10th Plansee Seminar (Reutte, 1981),
Vol.1, p.31.
- [19] M. Menyhárd, L. Uray,
Grain boundary segregation produced by
grain boundary movement,
Scripta Metall. 17 (1983), p.1195.
- [20] L. Uray, M. Menyhárd,
The segregation of iron in tungsten,
Physica Status Solidi 84 (1984), p.65.
- [21] Á. Böröczki A., Gaál I., Gurbán S., Menyhárd M.,
Horváth E., Tóth A.L., Petrás L., Balázs L.,
Electron stimulated thorium adatom enrichment
on the surface of thoriated tungsten below 2300K,
Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials
No.24. (2006), pp.343–349.

Illékonykomponens-analízis alkalmazása A^{III}-B^V félvezető eszközök technológiájában

DOBOS LÁSZLÓ, GERGELY GYÖRGY

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
dobos@mfa.kfki.hu

MOJZES IMRE

BME, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikai Technológia Tanszék

SZIGETHY DEZSŐ

Technoorg – Linda Kft.

Lektorált

Kulcsszavak: A^{III}-B^V félvezetők kontaktálása, tömegspektrometria, kipárolgó gázok, optimális technológiai paraméterek

Dolgozatunkban – elsősorban az EGA módszer segítségével – több A^{III}-B^V-ös vegyület-félvezető (GaAs, GaP, InP) és kontaktusfémmezés között lejátszódó kölcsönhatást vizsgáltunk. Célunk elsősorban a folyamatok alaposabb megértése és a tömegspektrometriai módszerek jó használhatóságának bemutatása volt. A kapott eredmények további információval szolgálnak a rendszerben lejátszódó termodinamikai-metallurgiai folyamatokról. Ohmos fémmezések tömegspektrometriai, elektromos és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata az optimális hőkezelés paramétereinek megállapítására nyújtott támpontot.

1. Bevezetés

A félvezető vegyületek közül elsősorban a periódusos rendszer III. és V. oszlopában levő elemek 1:1 arányú vegyületei váltak fontossá. Ezek az ún. A^{III}-B^V félvezetők, köztük is a legfontosabbak a GaAs és az InP, amelyek kétkomponensű vegyületek; a GaAlAs, a GaAsP háromkomponensű ötvözetek, valamint néhány négykomponensű ötvözet (például a GaInAsP) is egyre jelentősebbé váltak. A vegyület-félvezetők iránti egyre nagyobb igény oka az volt, hogy az elemi félvezetők (Ge, Si) fizikai tulajdonságaik rögzített volta – elsősorban az indirekt sávszerkezet – következtében önmagukban számos új igényt már nem tudtak kielégíteni.

A 90-es években a legszélesebb körben alkalmazott mikrohullámú és optikai félvezető anyag a direkt sávszerkezetű GaAs volt. A GaAs mellett egyre növekedett az InP szerepe a mikrohullámú eszközök (Gunn-dióda, LED, lézer) előállításában.

Az ohmos kontaktusok általában egyenirányító jellegűek közvetlenül a fémrétegek leválasztása után. Az ohmos jelleg a kontaktus hőkezelés során lejátszódó átrendeződése során alakul ki. A Schottky-kontaktusok is sokszor esnek át kényszerű hőkezelésen, például oxid leválasztás alatt, vagy éppen az azonos szeleten lévő ohmos kontaktusok hőkezelése során. Ezért a kontaktusokban hőkezelés alatt lejátszódó folyamatok vizsgálata, mind az ohmos, mind az egyenirányító esetben különösen fontos.

A vegyület-félvezetők ohmos és egyenirányító kontaktusainak kialakítása lényegesen nehezebb technológiai folyamat, mint ez a szilícium eszközöknél megszokott. Az alapvető nehézséget az okozza, hogy GaAs esetében nem létezik olyan fém, amely a félvezető széles koncentrációtartományában termikusan, mechanikailag és elektromosan olyan jó minőségű, megbízható kontaktust adna, mint a szilícium esetében az alumínium [1].

Az általában néhány száz fokos hőkezelés következményeként a vegyület-félvezető a felületén lévő fémréteg hatására elbomolhat. A keletkező bomlástermék általában illékony, GaAs esetén arzén, InP esetében foszfor, antimonid alapú vegyület-félvezetők esetében az antimon [2]. A hőkezelés során a lehűléskor további anyag átrendeződések jöhetnek létre, a fém-félvezető határfelületnél új fázisok jelenhetnek meg.

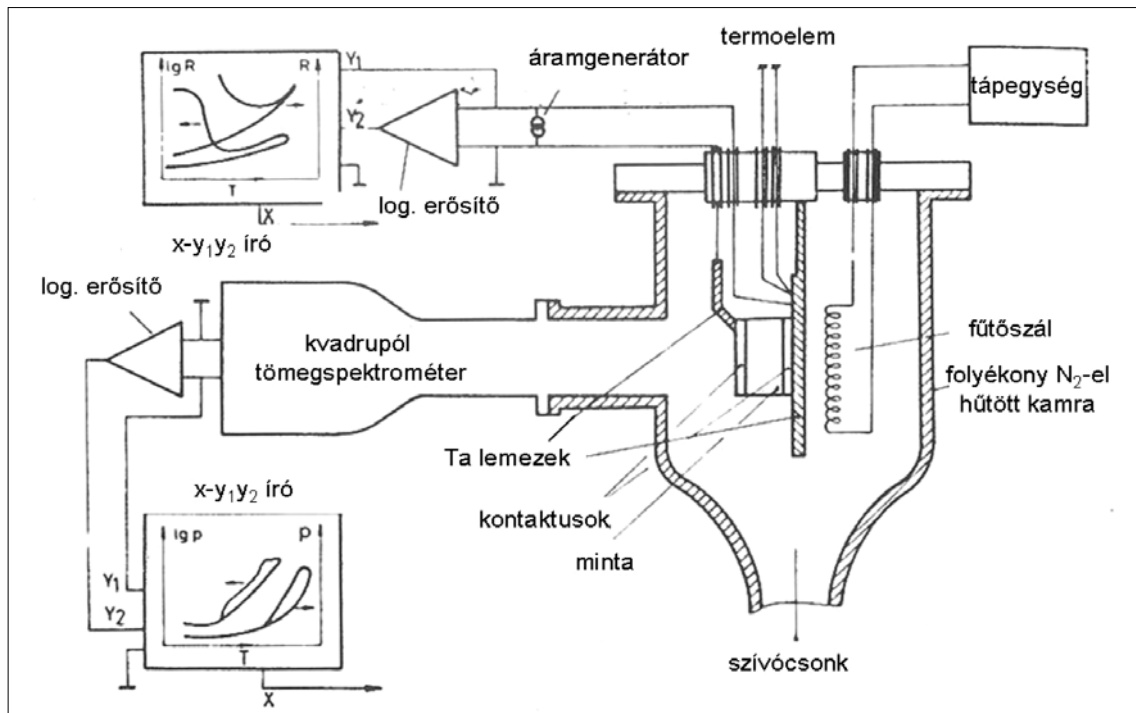
További nehézség az, hogy a hőkezelésnél a vegyület-félvezetőkben általában nem alakulnak ki olyan stabil fázisok, mint a szilíciumban a szilicidek, amelyekkel szinte minden kontaktálási feladat megoldható. Az egyes alkotóelemek transzportja mellett az alkotóelemek egymással is kölcsönhatásba léphetnek, új, az eredetiektől eltérő kémiai minőségű alkotóelemeket képezve.

A szokásos roncsolásos (AES, Auger Electron Spectroscopy mélységi elemzés, SIMS, Secondary Ion Mass Spectrometry), vagy roncsolásmentes (SEM-EPMA, Scanning Electron Microscopy Electron Probe X-ray Microanalysis, REELS-EPEs, Reflected Electron Loss Spectroscopy – Elastic Peak Electron Spectroscopy) vizsgálatok a kész termékről, a kontaktált félvezetőről utólag nyújtanak információt. Kíváncsú volt olyan eljárás kifejlesztése, mely lehetővé teszi a technológiai műveletek egyidejű, in situ követését, szükség szerint szabályozását.

1976-ban Sebestyén Tibor és munkatársai az MTA MFKI-ban új eljárást találtak fel és fejlesztettek ki [3], a kontaktált GaAs kristály hőkezelésével egyidejűleg tömegspektrométerrel detektálták az As₂ kipárolgását. A módszer „EGA” (EGA, Evolved Gas Analysis) elnevezése az azt átvevő P.K. Gallagher-tól, a Bell laboratórium-ból származik [4]. Az EGA a lejátszódó reakciók termodinamikájáról, kinetikájáról ad információt.

1977-ben az eljárást tovább fejlesztettük, a hőkezeléssel egyidejűleg mértük a kontaktált GaAs továbbá GaP kristály ellenállását a felfűtés, majd a lehűtés fo-

1. ábra
Illékony
komponens
mérésére
alkalmas
kisnyomású
kamra vázlata.



lyamán [5,6]. Az EGA módszert számos külföldi kutatóhely is bevezette és eredményeit publikálta [7]. Közük tartozott 1979-ben a Bell Laboratórium is, amelynek munkatársai GaAlAs-Au kölcsönhatás vizsgálatára alkalmazták [8].

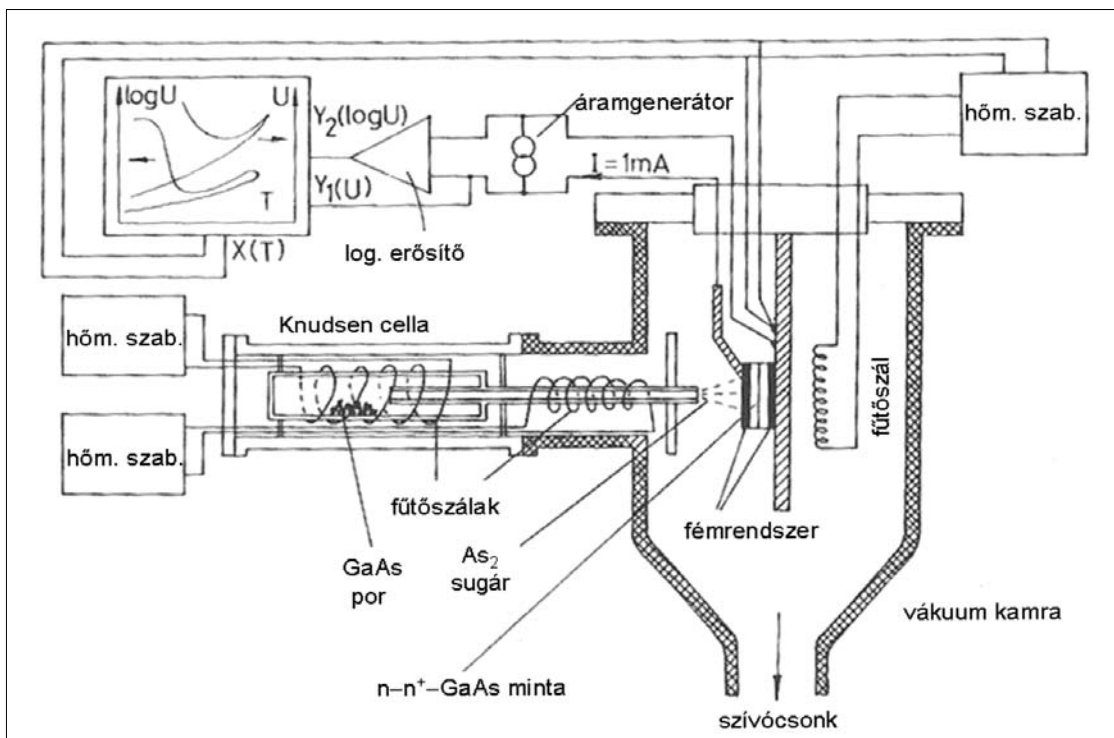
A következő években az MTA MFKI [9-11], majd a BME Elektronikai Technológia Tanszék számos kontaktus rendszernél, GaAs, GaP, InP stb., félvezető eszközök technológiájának kutatás-fejlesztésénél alkalmazta az EGA módszert, mely különösen fontosnak bizonyult a Gunn-diódáknál.

A következőkben a főbb eredményeket tekintjük át.

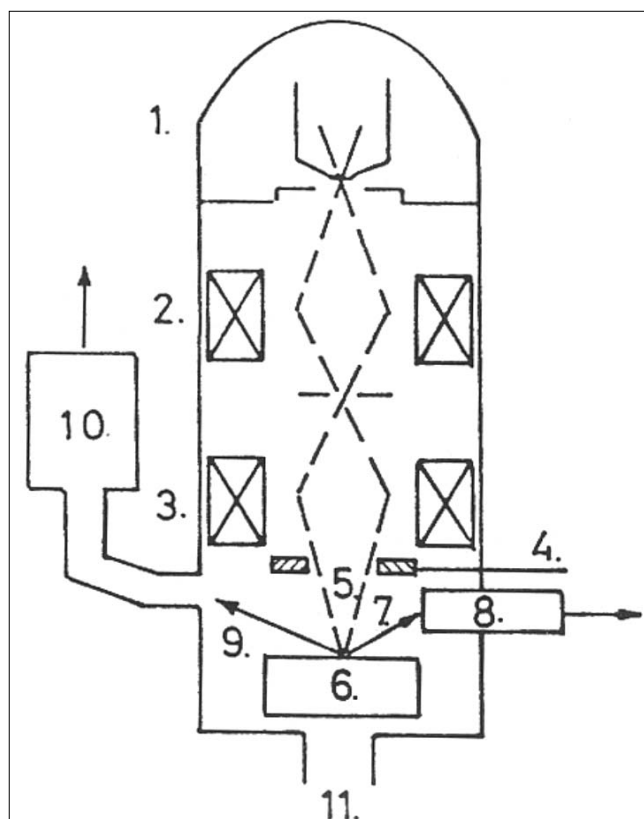
2. Kísérleti elrendezések

Az 1. ábra mutatja az EGA kísérleti elrendezését. A cseppfolyós nitrogén csapdával ellátott diffúziós szivattyúval 10^{-6} mbar vákuumot állítottunk elő a Tungsram Kutató UHV eszközeiből felépített mérőkamrában, melyhez Riber QML 51 tömegspektrométer csatlakozott.

A félvezető kristály minta mindkét oldalára felvittük a kontaktus rendszert, a mintát Ta hordozón rögzítettük. A kontaktusokon áramgenerátorral vezettünk át állandó áramot és regisztráltuk a feszültségét, így a minta ellenállását in situ, a hőkezeléssel egyidejűleg mértük [5].



2. ábra
Mintaellenállás
mérése
hőkezelés
és arzén
molekulasugár
egyidejű
alkalmazásával.

**Jelölések:**

- (1) elektronágyú (2) kondenzorlencse (3) objektívlencse
 (4) eltérítőkercs és stigmátor
 (5) fókuszált elektronnyaláb
 (6) fűthető mintatartóban elhelyezett mintadarab
 (7) szekunder elektron
 (8) reflektált (szekunder) elektronok detektora
 (9) a minta elpárolgó alkotóeleme
 (10) kvadrupól tömegspektrométer (11) szivattyúrendszer

3. ábra

Kísérleti elrendezés az elpárolgó alkotóelem veszteség (EGA) és a felületi morfológia pásztázó elektronmikroszkóppal történő in situ egyidejű megfigyelésére.

A 2. ábrán a mérőkamrához Knudsen-forrás csatlakozik, mely As_2 molekulásugarat bocsát a kontaktált kristályra a hőkezeléssel egyidejűleg [12]. Ez az eljárás modellez egy molekulásugaras epitaxiás berendezést, amelyhez akkoriban az embargó miatt nem sikerült hozzájutni [13].

A 3. ábrán az EGA egyesítése SEM pásztázó elektronmikroszkóppal látható, mely lehetővé teszi a kontaktus felületének in situ vizsgálatát hőkezelés alatt [14-16]. Ez a mérőrendszer JEOL JSM-T20 SEM-ből és ATOMKI Q100C kvadrupól tömegspektrométerből állt [17]. Vizsgáltuk a kipárolgás hőmérsékletének a párolgatott fémrétegek vastagságától való függését is.

3. Vizsgált anyagok, kontaktusok

Vegyület-félvezető eszközökben a legelterjedtebben használt és vizsgált kontaktusok arany alapúak. Az arany előnyös tulajdonságai közé tartozik, hogy nem oxidálódik, könnyen alakítható és nem rideg, ezért a félvezető

chipek kikötésére alkalmas. Nagyrészt ez indokolja használatát a technológiában alkalmazott kontaktusokban, a kontaktus-fémmezések kedvelt alap- vagy hordozó fémé.

Az arany és a többi nemesfém elsősorban az elektropozitív A^{III}-as komponenssel képez ötvözeteket [18]. Az arany arzénnel nem is képez vegyületet.

Az arany-germánium nem jól nedvesíti a GaAs felületét, és hajlamos a „balling-up”-ra („cseppesedésre”) a hőkezelés során. Ez megakadályozható egy vékony nikkel rétegnek az arany-germánium tetejére történő levalasztásával [19-20].

A Pd fémzés a bonyolult vegyület-félvezető eszközök ohmos kontaktus technológiájának ígéretes eleme [14]. Technikai szempontból a Pd fémréteget Au réteggel kell bevonni, a kontaktus jobb kiköthetősége végett.

A vizsgálatoknál kereskedelmi forgalomban kapható GaAs, GaP és InP kristályokat használtunk. Ezekre vákuumpárolgatással vittük fel a fém, illetve fém + Ge kontaktus réteg rendszereket. Ezek vastagságát szabályoztuk. Tipikus tartomány 40-1000 nm. Néhány tipikus kontaktus volt: AuGeNi, SnAg, InGeAg, AuNi, AgNi GaAs esetében, AuGeNi GaP esetében, Pd, AuPd InP esetében.

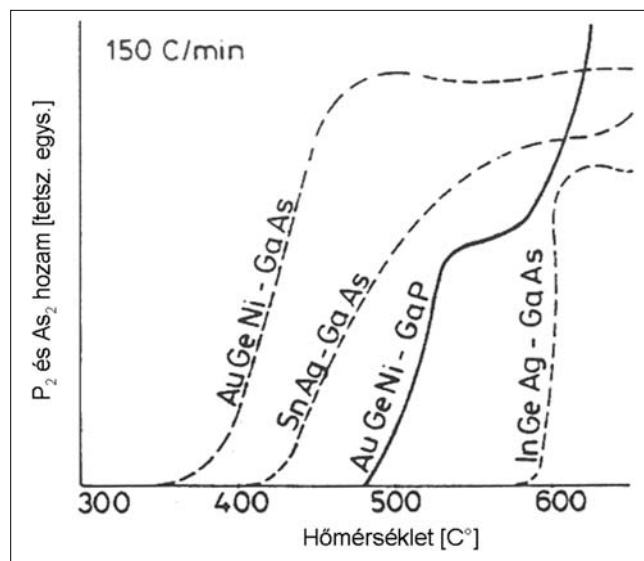
4. Kísérleti eredmények

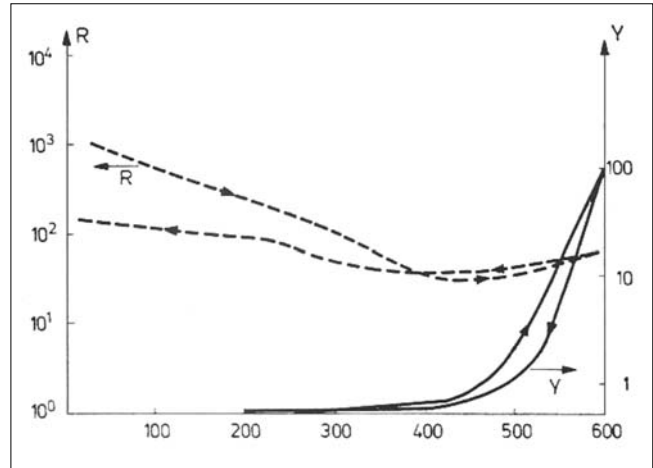
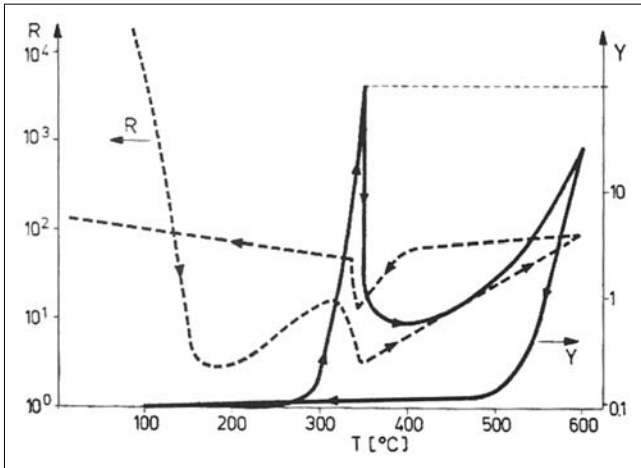
A 4. ábra különböző fémmezésekkel fedett GaAs és GaP hordozók EGA görbéit mutatja [5]. Az As_2 vagy GaP esetén a P_2 felszabadulási hőmérséklete függ a vékonyréteg kontaktus összetételétől, amint azt az ábra mutatja. Az As_2 ugrásszerű növekedését mutatta a tömegspektrométer az ötvöződési hőmérséklet elérésénél.

A technológiai kísérleteink célkitűzése kis fajlagos ellenállású ohmos kontaktusok előállítás. Y a párolgás intenzitása, a tömegspektrométerrel mért jel (tetszőleges egységekben), R az ellenállás, pillanatnyi értékét a

4. ábra

A P_2 és As_2 kipárolgása a hőmérséklet függvényében különböző fémmezésekkel borított GaAs és GaP hordozók esetén.





5. és 6. ábra Ellenállás-hőmérséklet jelleggörbék az első és a második hőkezelési ciklus alatt.

kristály-kontaktus rendszer határozza meg, de ismételt hőkezelés után lényegesen megváltoznak. A tömegspektrométer minden esetben As_2 és P_2 molekulákat mutatott, Ga-t sohasem észleltünk.

Az 5. ábra Au-GaAs-Au rendszer R és Y görbéit mutatja az első, a 6. ábra pedig a második hőkezelési ciklus, felmelegítés-hűtés folyamán, $150^\circ\text{C}/\text{perc}$ mellett [22].

A görbék menetéből lehet következtetni a kialakult kontaktus minőségére. Ha a hőkezelés első ciklusa nem bizonyul elégségesnek, akkor ismételt hőkezelés alkalmazásával az tovább folytatható.

A 7. ábra az As_2 molekulásugár alkalmazásának hatását mutatja 580 nm AuGe + 90 nm Ni + 150 nm Au kontaktus rendszerrel ellátott GaAs esetében [12]. A kísérletek azt mutatták, hogy As_2 -sugár alkalmazásával a mintán kisebb ellenállású kontaktust lehetett létrehozni, ha a hőkezelést az egyébként optimált hőmérsékleten végeztük el.

Feltételeztük, hogy a kontaktusfémbe diffundáló arzén a már előzőleg bevitt galliummal szintetizálódva epi-

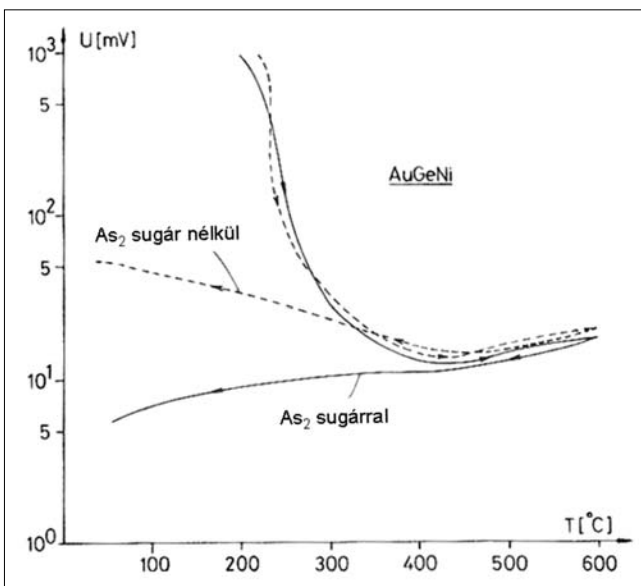
taxiás réteggé válik le a GaAs hordozón. E feltevést megerősítették az ötvözés közben és utána felvett áram-feszültség karakterisztikák is. Ez az eljárás az úgynevezett vékony fázisú epitaxia (Thin Phase Epitaxy) egyik olyan megvalósítása [12], mely egyszerűségénél fogva az eljárás széleskörű alkalmazását gyorsította meg.

In situ pásztázó elektronmikroszkópos hőkezeléssel vizsgáltuk a fém – vegyület-félvezető kontaktusok kipárolgását és a felületükön kialakult mikrostruktúrák változását. Az elektronmikroszkópos felvételeken jól látható volt, hogy jelentősen eltértek egymástól az in situ és az ex situ felvett felületi képek. Ez jól demonstrálja, hogy a hőkezelés alatt kialakuló felületi szerkezetek tanulmányozásához elengedhetetlen az in situ vizsgálatok lehetővé tétele. Ilyen vizsgálatokat végeztünk, például InP-dal, mértük annak termikus bomlását, mind magának az anyagnak, mind fémezett mintaként különféle kontaktusanyaggal.

A 8. ábra az InP termikus bomlását mutatja $36^\circ\text{C}/\text{perc}$ felfűtésnél [16,23].

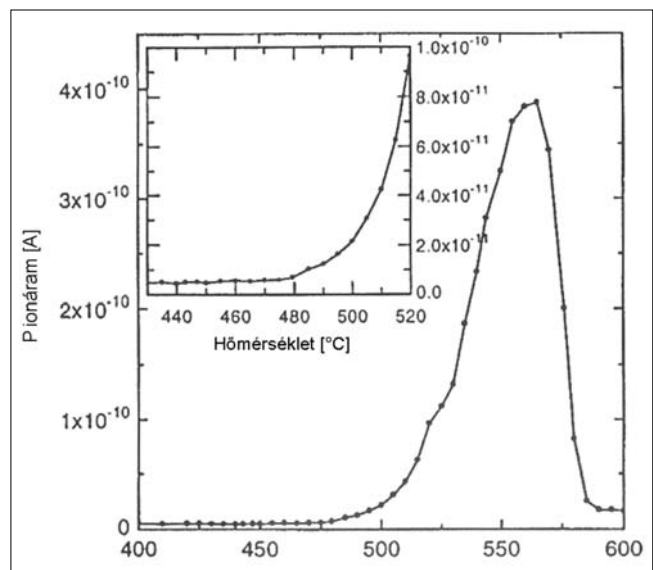
7. ábra

Feszültség-hőmérséklet jelleggörbék AuGeNi kontaktus rendszer esetén.



8. ábra

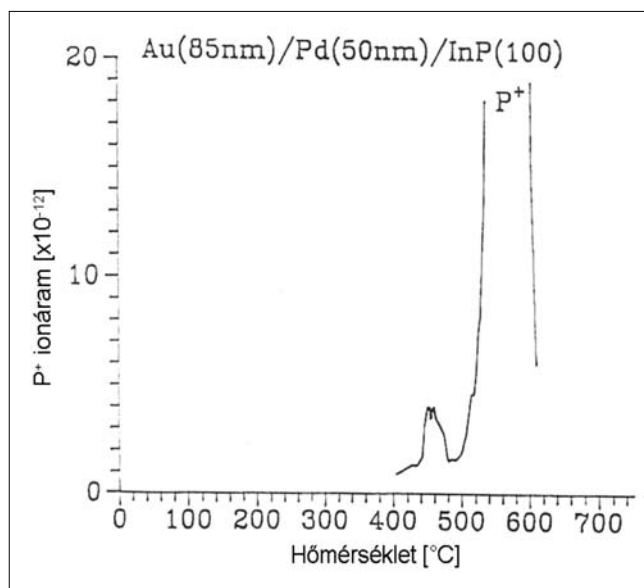
Foszfor kipárolgás a tömbi InP(100) mintából a hőmérséklet függvényében.



A fémezetlen InP foszfor kipárolgása 480°C alatt a háttérzajnál kisebb, majd meredeken emelkedik, az InP erős bomlását mutatva. A foszfor kipárolgása megemelt hőmérsékletnél makroszkópikus gödröket eredményezett [16,23].

Az InP bomlás alábbi szakaszait figyeltük meg: In csepp képződés, a gödrök megjelenése és növekedése [16,23]. Az In csepp képződést a P kipárolgás idézte elő. A kipárolgás fő hulláma 520°C körül kezdődik, a jelentős felületi degradációnak tulajdoníthatóan. A kipárolgás mértéke csökken 570°C felett, a P kiürülésnek és az In felhalmozódásnak köszönhetően. Eredményeink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy általában véve az InP hőkezelési technológia szempontjából elég a gödrök elkerülésére optimalizálni.

A kialakított EGA-SEM berendezés és mérési módszer – melyet a világon elsőként valósítottuk meg – segítségével többek között a Pd-alapú ohmos kontaktus-fém-rendszerek hőkezelés során végbemenő anyagátrendeződéseit tanulmányoztuk.



9. ábra

Az Au (85nm) / Pd (50nm) / InP (100) minta foszfor kipárolgása a hőmérséklet függvényében.

A 9. ábra Au (85 nm) + Pd (50 nm) kontaktussal ellátott InP hordozó P₂ kipárolgását mutatja [14]. A vizsgálatok során két csúcsot kaptunk az Au/Pd fémezés esetén. 500°C alatt a foszfor kipárolgás nem emelkedik ki a háttérből. 600°C körül a Pd-rétegnek tulajdoníthatóan egy óriási csúcsot, míg az Au-rétegnek tulajdoníthatóan egy második, kisebb csúcsot kaptunk 460°C környékén. Ez az aranynak tulajdonítható csúcs sokkal kisebb, mint a Pd-InP kölcsönhatásnak tulajdonított első csúcs.

Az Au/Pd/InP mintánál a 460°C-ot elérve az Au már elegendő mennyiségben diffundált át a Pd-on ahhoz, hogy észlelhető mértékben megindítsa az InP bomlását és ezáltal a P-atomok kipárolgását (9. ábra). A felületi morfológia jelentősen változott az EGA diagram karakterisztikus pontjainál.

Ohmos fémezések esetén a kipárolgási görbék összevetése a SEM felvételekkel, valamint elektromos mérésekkel (például kontaktus ellenállás meghatározása) az optimális hőkezelés stratégiájának megállapításához nyújt segítséget, melynek technológiai vonzata jelentős.

5. Konklúzió

A fémrétegek különféle változatával fedett A^{III}-B^V vegyületek hőkezelése folyamán nagy illékony alkotóelem veszteséget lehetett észlelni a vízszintesen elhelyezett minta felett az EGA módszert alkalmazva. Elsőként egyesítettük ezt a technikát pásztázó elektronmikroszkóppal, és in situ vizsgálatokat hajtottunk végre mind az illékony alkotóelem veszteség, mind a felületi morfológia figyelése érdekében [15,16].

Ezek a vizsgálatok lehetővé teszik a kontaktálási technológiai műveletek in situ követését és ellenőrzését.

Különböző fém-félvezető rendszereket vizsgálva azt tapasztaltuk, hogy az illékony alkotóelem veszteség-mintahőmérséklet görbe jellemző a vizsgált anyagrendszerre, az alkalmazott fémezés vastagságára és több-rétegű fémezések esetén a fémrétegek sorrendjére is.

Az EGA görbe alakja megváltozott a párologtatott fémréteg vastagságának függvényében. A vastagabb fémezéssel rendelkező kontaktusok hőkezelésénél magasabb hőmérsékleten jelenik meg a jellegzetes illékony komponens veszteség [15,16].

Az eredményeket a mikrohullámú félvezető eszközök fejlesztésében alkalmaztuk, így például a tömegspektrométeres vizsgálatok információt szolgáltatottak Ga-As Gunn-diódák kontaktálási folyamatainak feltáráshoz.

Köszönetnyilvánítás

Együtt dolgoztunk az irodalomjegyzékben feltüntetett társszerzőkkel. Kiemeljük Sebestyén Tibort, akivel közös munkát végeztünk 1979-ig, továbbá Barna Árpádot, Barna B. Pétert, Belezna Ferencet, néhai Stark Gyulát, aki a kontaktálás kidolgozásában segített bennünket. A közös munkát nagyra becsüljük és eredményesnek tartjuk. A bemutatott terület eredményei alapján eddig egy nagydoktori és mintegy 8-10 kandidátusi, illetve később PhD értekezés született, megteremtve a további sikeres kutatás alapjait.

Irodalom

- [1] Mojzes, I.:
"GaAs alapú monolit integrált áramkörök",
Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1988).
- [2] I. Mojzes, R. Veresegyházy, B. Kovács, S. Gurbán,
B. Pécz, Gy. Radnóczy:
Proc. 4th International School ISSPPM '85,
Varna, Bulgaria, May 11-18, (szerk.: J. Kassabov),
Singapore, World Scientific, (1985), p.214.
- [3] T. Sebestyén, M. Menyhárd, D. Szigethy:
"In situ measurements of arsenic losses during
annealing of the usual evaporated contacts
of GaAs Gunn diodes",
Electronics Lett. 12 (1976), p.96.
- [4] P.K. Gallagher:
"An Evolved Gas Analysis System",
Thermochimica Acta 26 (1978), p.175.
- [5] D. Szigethy, T. Sebestyén, I. Mojzes, G. Gergely:
„Study of the arsenic and phosphorus losses during
annealing of metal contacts on GaAs and GaP”,
Proc. 7th International Vacuum Congress
3rd International Conference,
Solid Surfaces Vienna 2 (1977), p.1959.
- [6] I. Mojzes, T. Sebestyén, D. Szigethy:
"Volatile component loss and contact resistance of
metals on GaAs and GaP during annealing",
Solid-State Electronics, Vol. 25, No.6, (1982).
pp.449–460.
- [7] S. Leung, L.J. Wong, D.D.L. Chung, A.G. Milnes:
Journal Electrochem. Soc. 130 (1983), p.462.
- [8] E. Kinsbron, P.K. Gallagher, A.T. English:
Solid-St. Electron. 22 (1979), p.517.
- [9] R. Veresegyházy, I. Mojzes, E. Lendvay:
"Mass-spectrometric study of contact sintering
in the GaSb/Au system",
Thin Solid Films 138 (1986) L55.
- [10] B. Pécz, E. Jároli, Gy. Radnóczy,
R. Veresegyházy, I. Mojzes:
"Pyramidal pit formation at the Au/GaAs interface
during annealing",
Physica Status Solidi (a) 94, No.2, (1986).
pp.507–513.
- [11] R. Veresegyházy, B. Pécz, I. Mojzes:
"The influence of gold layer on the thermal
decomposition of InAs",
Physica Status Solidi (a) 94 (1986) K11.
- [12] I. Mojzes, T. Sebestyén, P.B. Barna,
G. Gergely, D. Szigethy:
„Gallium plus metal contacts to GaAs alloyed
in an arsenic molecular beam”,
Thin Solid Films, 61, No.1. (1979),
pp.27–32.
- [13] Mojzes Imre:
"Kell-e nekünk MBE?"
Vákuum Évkönyv 1988., szerk.: Mojzes I.,
HU ISSN 0238-8596, MTESZ Budapest,
pp.85–87.
- [14] L. Dobos, J. Karányi, B. Pécz, B. Kovács,
I. Mojzes, V. Malina:
"Palladium based contacts to GaAs and InP",
Periodica Polytechnica Ser. El. Eng. 37, No.1. (1993).
pp.21–30.
- [15] Dobos László:
Fémvegyület-félvezető kölcsönhatás pásztázó
elektronmikroszkópos és tömegspektrometriás
vizsgálata a hőkezelés alatt – doktori értekezés,
(témavezető: Dr. Mojzes Imre) 1992.
- [16] Dobos László:
Fémvegyület-félvezető szerkezetek
fraktáltulajdonságai – Ph.D. értekezés,
(témavezető: Dr. Mojzes Imre) 1998.
- [17] L. Dobos, B. Kovács, I. Mojzes, V. Malina,
B. Pécz, J. Karányi:
"The volatile component loss and the surface
morphology of the gold-palladium metallizations to
the compound semiconductor structures",
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 260 (1992), p.641.
- [18] A.K. Sinha, J.M. Poate:
"Thin Films-Interdiffusion and Reactions",
John Wiley&Sons, New York 1978.
(szerk.: J.M. Poate, K.N. Tu, J.W. Mayer), p.407.
- [19] G.Y. Robinson:
Solid-State Electron. 18 (1975), p.331.
- [20] B. Kovács, L. Dobos, B. Pécz, Gy. Vincze,
Zs.J. Horváth:
"Room temperature interaction of
the AuGeNi metallization with GaAs",
In: Formation of Semiconductor Interfaces,
szerk.: B. Lengeler, H. Lüth, W. Mönch, J. Pollmann,
World Scientific Co., Singapore, (1994), p.317.
- [21] D.G. Ivey, P. Jian, R. Bruce:
Journal Electronic Mat. 21(8) (1992), p.831.
- [22] D. Szigethy, G. Gergely, I. Mojzes, T. Sebestyén,
M. Riedel:
"Mass spectrometric study of semiconductor layer
structures",
Acta Phys. Acad. Sci. Hun. 49 (1-3) (1980) p. 199.
- [23] F. Riesz, L. Dobos, J. Karányi:
"Thermal decomposition of bulk and heteroepitaxial
(100) InP surfaces: A combined in situ scanning
electron microscopy and mass spectrometric study",
Journal Vac. Sci. Technol. B 16 (1998), p.2672.

GaInAsP/InP infravörös diódák és lézerek

RAKOVICS VILMOS, PÜSPÖKI SÁNDOR, SERÉNYI MIKLÓS, RÉTI ISTVÁN,
BALÁZS JÁNOS, BÁRSONY ISTVÁN

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
rakovics@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: félvezető lézer, infravörös diódák, GaInAsP, InP, epitaxiás növesztés folyadékfázisból

Az infravörös tartományban sugárzó GaInAsP/InP félvezető lézereket és infravörös diódákat előállítottunk elő. A GaInAsP és InP rétegek növesztésére folyadékfázisú növesztési technológiát dolgoztunk ki, amelyet sikeresen alkalmaztunk különböző hullámhosszú új félvezető eszközök kifejlesztésére. Ebben a cikkben röviden összefoglaljuk az általunk kifejlesztett lézerek és infravörös diódák legfontosabb paramétereit és felhasználási területüket.

1. Bevezetés

A III-V kétkomponensű félvezetők felfedezésével szinte egy időben megszületett az a felismerés, hogy ezen anyagok szilárdfázisú elegyei alapját képezhetik különleges tulajdonságú félvezető eszközök tervezésének. A háromkomponensű anyagok tiltott sávja és rácsállandója közötti egyértelmű összefüggéssel ellentétben a négykomponensű anyagokkal a rácsállandó és a tiltott sáv szélessége egymástól függetlenül változtatható az összetevők arányának megváltoztatásával.

A GaInAsP kvaterner GaAs és InP hordozóhoz egyaránt rácsilleszthető. A GaAs-hez rácsillesztett anyag tiltott sávszélessége 1,42-1,91 eV, az InP-hoz illeszkedő kvaterneré pedig 0,75-1,35 eV tartományban változtatható. GaInAsP félvezetőben a gerjesztett töltéshordozók rekombinációjával keletkező elektromágneses sugárzás hullámhossza a fordítottan arányos az anyag tiltott sáv energiájával. Az aktív réteg összetételének változtatásával változik a diódából kilépő sugárzás hullámhossza.

A III-V félvezetőkön végzett kutatásokat főleg a gyorsan fejlődő fénytávközlésben és a szelektív spektroszkópiában alkalmazott félvezető fényforrások iránt jelentkező igény motiválta [1]. A témában folyó korai nemzetközi és hazai kutatásokról Lendvai Ödön [2], valamint Lajtha György és Szép Iván [3] könyveiből olvashatunk magyarul. Különösen a kis küszöbáramú és a kívánt hullámhosszon működő nagy hatásfokú, folyamatosan üzemben működő lézerdiódák létrehozása volt nagy kihívás az anyagtechnológiai kutatással foglalkozó szakemberek számára. A feladat nehézségét az okozza, hogy a lézerhatás létrejöttéhez négy alapfeltételt kell együttesen biztosítani:

- sugárzásos átmenet a megfelelő energiájú szintek között;
- fordított betöltöttség létrejötte;
- stimulált emisszió;
- az optikai küszöb átlépése.

Hogy ezek a feltételek már kis meghajtó áramoknál létrejőjenek, mind az injektált töltéseket, mind a keletke-

ző fotonokat kis térrészre kell koncentrálni. Az aktív réteget minden oldalról nagyobb tiltott sávú és kisebb törésmutatójú anyagoknak kell határolni, valamint az eszközön átfolyó áramot az aktív tartományra kell korlátozni.

A félvezető heteroszerkezetek létrehozására alkalmas epitaxiás módszerek közül gyorsaságával és olcsóságával a folyadékfázisú epitaxiás (LPE, Liquid Phase Epitaxy) módszer tűnik ki, ezért a legtöbb lézerszerkezet kifejlesztésére ezt használták. A fénytávközlési célra kifejlesztett kis küszöbáramú lézerek megbízhatóságát rontotta, hogy a p-n átmenetek és az aktív rétegük határán számos kristályhibát tartalmaztak. Az MFKI-ban és MFA-ban folyó kutatások olyan heteroszerkezetek létrehozására irányultak, amelyek nem tartalmaznak maratott felületeken kialakított átmeneteket, egylépcsős LPE technológiával előállíthatók, de a belőlük készült infravörös diódák és lézerek legfontosabb paramétereai hasonlóak vagy jobbak, mint a bonyolultabb technológiával készülő korábbi eszközöké.

2. GaInAsP/InP kettős heteroszerkezetű infravörös diódák és lézerek felépítése és működése

Az InP hordozóhoz rácsillesztett GaInAsP/InP heteroszerkezetek felhasználásával 920-1670 nm-es tartományban sugárzó infravörös diódák és injekciós lézerek készíthetők. A diódák aktív tartományában a p-n átmenetre merőleges rétegszerkezet a következő:

- a hordozóval azonos típusú InP határoló réteg;
- GaInAsP aktív réteg;
- a hordozóval ellentétes típusú InP határoló réteg.

Mivel az aktív réteg kisebb tiltott sávval és nagyobb törésmutatóval rendelkezik mint a határoló rétegek, a kettős heteroszerkezet az átmenetre merőlegesen összetartja az injektált töltéshordozókat és a keletkező fotonokat. A lézersugár széttartása az átmenetre merőlegesen az aktív réteg vastagságának a függvénye. Az GaInAsP/InP lézerek küszöbárama (I_{th}) erősen hőmérsékletfüggő[4].

Az 1. ábra egy GaInAsP/InP lézer tipikus teljesítmény-áram karakterisztikáit mutatja több különböző hőmérsékleten 20 és 80°C között. A küszöbáram nő, a hatásfok pedig csökken a hőmérséklet növekedésekor. Az InP/InGaAsP lézerek küszöbáramának erős hőfokfüggése miatt a küszöbáramot a lehető legkisebbre kell lecsökkenteni. A küszöbáram erősen függ a lézer geometriai paramétereitől [5] a következők szerint:

$$I_{th} = LWd(\alpha/\beta\Gamma_v + I_0), \quad (1)$$

ahol $\alpha = \alpha_i + [\ln(1/R)]/L$.

L , W és d az aktív réteg hossza, szélessége és vastagsága, α és β a lézer veszteségi és erősítési tényezője, Γ_v az úgynevezett fényösszetartási faktor, I_0 pedig az erősítés eléréséhez szükséges küszöbáramsűrűség egységnyi vastagságú réteg esetén. β és I_0 a geometriai paraméterektől független, de Γ_v kis keresztmetszetű aktív réteg esetén erősen függ az aktív réteg szélességétől és vastagságától, α_i a belső, $[\ln(1/R)]/L$ pedig a rezonátortükrökhöz kapcsolódó veszteségi tényező, R a tükröreflexió.

A lézerek hossza a differenciális kvantumhatásfokra (η_d) is hatással van [6-8].

$$1/\eta_d = 1/\eta_i [1 + \alpha_i L / \ln(1/R)], \quad (2)$$

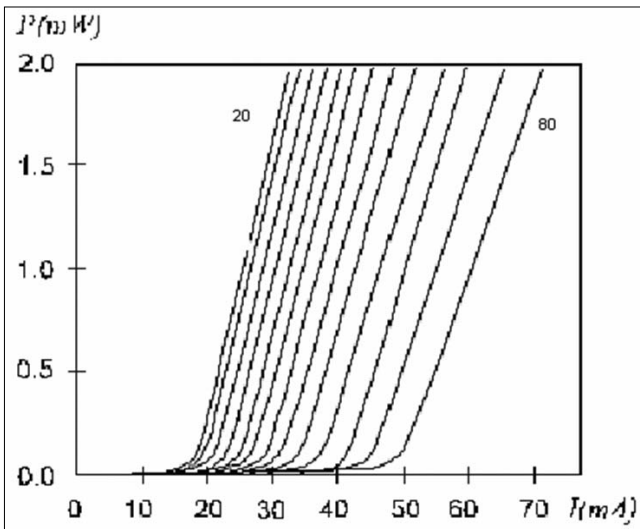
ahol η_i a belső kvantumhatásfok.

A legtöbb gyakorlati alkalmazás esetén a működési tartományban a lézerből kilépő sugárzásnak stabil téreloszlással kell rendelkeznie. A kilépés szögét a hullámvezetőben kialakuló transzverzális módusok szabják meg. Kellően vékony hullámvezetőben csak egyetlen módus terjedhet, ezért a kis keresztmetszetű hullámvezető kialakításával biztosítható a lézersugár stabil téreloszlása. A fénytávközlési célra korábban kifejlesztett 1300 és 1550 nm-en sugárzó kis küszöbáramú lézerek többnyire két epitaxiális lépést tartalmazó technológiával készültek és az aktív réteg elhelyezkedése szerint két típusba sorolhatók [9-12].

1. ábra

A GaInAsP/InP lézerek

teljesítmény-áram karakterisztikájának hőfokfüggése (1550 nm-en sugárzó GaInAsP/InP BH-lézer 20-80°C-on) [4]



Az aktív réteg elhelyezkedése szerint meza és csatorna típusú lézerekről beszélhetünk. A meza típusú lézerek előállítása során először a kettős heteroszerkezet növesztik sík hordozón, majd ezt követően meza-marással és ránövesztéssel alakítják ki az eltemetett aktív réteget és a záróréteget egyaránt tartalmazó lézerszerkezetet [9,12-14].

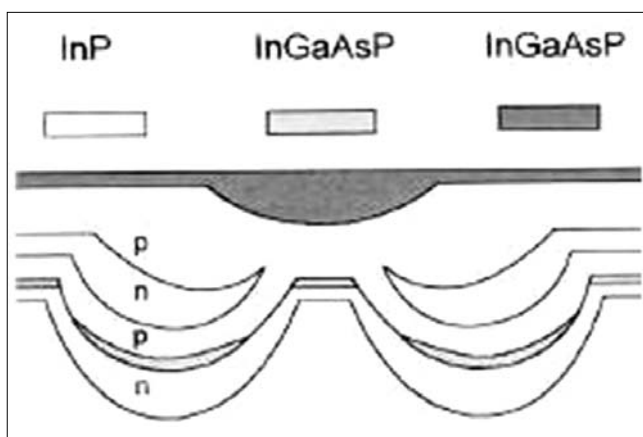
A lézerek másik csoportjánál először készítik el az áramkorlátozó zárószerkezetet, majd abban keskeny csatornát nyitnak és a második növesztési lépésben a csatorna alján alakul ki az eltemetett aktív réteg [10-11]. N-típusú hordozón a meza típusú, p-típusú hordozón pedig a csatorna típusú lézerek előnyösebbek, mert ezeknél esik egybe a legkisebb ellenállású áramút az aktív réteg közepével. Azt tapasztalták, hogy a kétlépcsős technológia kihozatala jelentősen kisebb, mint az egylépcsős növesztéssel készülő lézereké. A hagyományos eltemetett aktív rétegű lézerek megbízhatóságát rontotta, hogy a p-n átmenetek és az aktív rétegük határán számos kristályhibát tartalmaztak. A hibák összefüggnek a gyártási technológia lépéseivel. A maratás során keletkező felületek hibái növelik a nemsugárzós átmenetek valószínűségét. A adalékok nemkívánatos diffúzióját okozhatja a második epitaxiális növesztés okozta hőkezelés. A maratott nem sík kristályfelületen magas hőmérsékleten lejátszódó anyagtranszport és hőbomlás szintén számos hibahely forrása lehet.

A nyolcvanas évek elejétől megfigyelhető az a törekvés, hogy a keskeny szalaglézereket egyetlen epitaxiális növesztéssel hozzák létre [12,15-17], ugyanis azt tapasztalták, hogy a kétlépcsős epitaxiális növesztéssel készülő lézerek megbízhatósága kisebb, és a megfelelő paraméterű lézerek kihozatala rosszabb a bonyolultabb technológia következtében. Olyan módszert fejlesztettünk ki, amely csak egy epitaxiális lépést tartalmaz, amelynek során egyidejűleg létrejön a keskeny eltemetett aktív réteg és a laterális áramszétfolyást hatékonyan akadályozó zárószerkezet is.

3. Új lézerszerkezetek és előállításuk egylépcsős folyadékepitaxiális módszerrel

A modern félvezető lézerek szerkezeti felépítésének közös jellemzője, hogy kis keresztmetszetű InGaAsP eltemetett aktív réteget és a szerkezetbe épített áramkorlátozó rétegeket tartalmaznak. Az aktív tartományban a rétegek sorrendje megegyezik a hagyományos szalaglézerekével. Az első réteg a hordozóval azonos típusú, nagy tiltott sávú és kis törésmutatójú InP, ezt a kívánt hullámhossznak megfelelő összetételű, kisebb tiltott sávval és nagyobb törésmutatóval rendelkező InGaAsP aktív réteg, majd a hordozóval ellentétes típusú InP réteg követi. Az aktív tartományon kívül elhelyezkedő rétegek pedig megakadályozzák az áram átfolyását, azáltal, hogy záró p-n átmenetet, vagy félszigetelő réteget tartalmaznak. Az irodalomban korábban ismertett lézerszerkezetek többségét csak két vagy több

epitaxiás lépést és az előző lépésben növesztett szerkezet kémiai marását tartalmazó technológiával lehet előállítani. A marási művelet és az ismételt növesztés okozta hibahelyek miatt ezen lézerek megbízhatósága kisebb, mint az egylépcsős növesztéssel készített lézereké. Az előző szakaszokban megmutattuk, hogy a növesztési paraméterek megfelelő megválasztásával nagyon változatos laterális tagoltsággal rendelkező InP és InGaAsP rétegek növeszthetők strukturált InP hordozón, ezáltal lehetséges a fenti funkciókat ellátó rétegek egyidejű létrehozása egyetlen folyadékepitaxiás növesztéssel. Az elvégzett kísérletek alapján lehetővé vált kiváló működési paraméterekkel rendelkező új lézerszerkezetek megalkotása, a rétegszerkezet és összetétel, valamint a rétegek töltéshordozó-koncentrációjának pontos beállítása.



2. ábra

A duplacsatornás hordozójú, eltemetett aktív réteget és beépített záró réteget tartalmazó kettős heteroszerkezetű InP/InGaAsP lézerdíoda felépítése

A duplacsatornás InP hordozón végzett növesztési kísérleteink megmutatták, hogy a legkedvezőbb eszközparamétereket biztosító félvezető heteroszerkezet valamennyi rétegét a kívánt formában elő lehet állítani a hordozón fellépő rendkívül nagy nukleációs és rétegnövekedési különbségek kihasználásával. Az $\langle 110 \rangle$ kristálytani iránnyal párhuzamos csatornapár között kialakuló mezacsíkon a mezhordozójú lézerhez hasonlóan megnöveszthető a keskeny eltemetett aktív réteget tartalmazó kettős heteroszerkezet, és ugyanakkor könnyen kialakul a meza felett nyitott zárószerkezet is (2. ábra). A duplacsatornás InP hordozó biztosítja a megfelelő rétegszerkeztúra kialakulását. A szerkezet 8-10 μm széles és 4-5 μm mély csatornákat tartalmazó n-InP hordozón épül fel. A csatornák páronként helyezkednek el, úgy hogy a csatornák közötti mezacsík szélessége 2 μm .

A szerkezet félvezető rétegei a következő sorrendben követik egymást:

- n-InP puffer réteg
(Sn: $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 0,5-1 μm vastag)
- InGaAsP aktív réteg
(adalékolatlan, $\lambda_g = 1,3 \mu\text{m}$, 0,1-0,2 μm vastag)
- p-InP határolóréteg
(Zn: $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 0,5-1 μm vastag)

- n-InP záró réteg
(Sn: $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 0,5-1 μm vastag)
- p-InP betöltő réteg
(Zn: $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 2-4 μm vastag)
- p⁺ InGaAsP kontaktus réteg
(Zn: $3-5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 0,5-1,5 μm vastagságú)

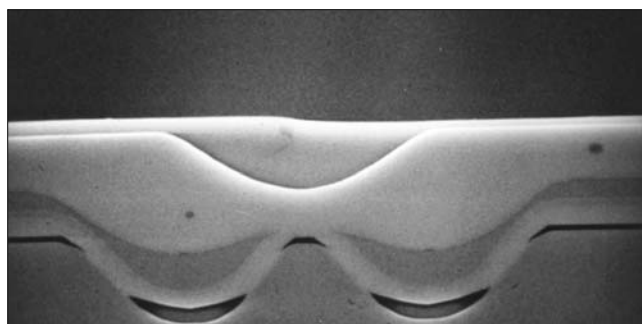
A hordozó felületét befedő n-InP puffer réteg közel egyenletes vastagságú, ugyanakkor a legnagyobb görbületű felületeket kissé vastagabban fedi. A puffer réteget követő aktív réteg 5 szeparált részből áll, amelyekből 2 rész a csatornapár jobb és bal oldalán, kettő a csatornák aljában, egy pedig a keskeny mezacsíkon helyezkedik el. Az InGaAsP aktív réteg a meza felett a legvékonyabb, a csatorna aljában pedig a legvastagabb. Az aktív réteget p-InP határoló réteg fedi be, mely a puffer réteghez hasonló szerkezetű folytonos réteg. A következő n-típusú InP réteget ismét p-InP réteg követi. Az n-InP záró réteg a meza felett megszakad, a p-InP réteg pedig betölti a két csatornát, és a meza felett kissé vékonyabb, mint a sík felületen.

A szerkezet p⁺-InGaAsP kontaktus réteget tartalmaz, amely általában a mezacsík feletti mélyedésben a legvastagabb. A nagy vezetőképességű mezán elhelyezkedő keskeny aktív réteg a legkisebb ellenállású áramútban helyezkedik el, az aktív tartományon kívül pedig az áram átfolyását megakadályozza a p-rétegek közé ágyazott n-típusú záró réteg, ezért a lézerszerkezetből kis küszöbáramú és nagy teljesítményű eszközök egyaránt készíthetők. A kis tiltott sávú InGaAsP réteg a tirisztor jellegű p-n-p-q-n zárószerkezetet annyira hatékonyra teszi, hogy az átfolyó szivárgóáram elhanyagolható mértékűvé válik. A lézereküszöb eléréséig a meza oldalfalai mentén, a csatorna alján elhelyezkedő átmenet felé is folyhat áram a keskeny p-InP határoló rétegen keresztül. Ennek a szivárgó áramnak a nagysága a két kvaterner réteg közötti szeparációs távolság növelésével csökken, ezért a legkisebb küszöbáramú lézereket a legnagyobb növekedési szelektivitást mutató 1,3 μm -es InGaAsP aktív réteget tartalmazó lézerszerkezetből sikerült előállítani.

A zárószerkezetet alkotó rétegek töltéshordozó koncentrációja $1-3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, ezért a zárószerkezet nagy parazita kapacitású, amely rontja a lézerek nagyfrekvenciás tulajdonságait. A lézerszerkezet keresztmetszetének elektronmikroszkópos (SEM) felvételét a 3. ábra mutatja.

3. ábra

SEM kép az 1,3 μm -es duplacsatornás lézerszerkezet hasított és mart felületéről. A marker 10 μm -nek felel meg.



3.1. Kis parazita kapacitású lézerszerkezetek

A záró rétegek adalékoltságának csökkentésével ugyan csökken a parazita kapacitás, de az áram-teljesítmény karakterisztika – különösen magas hőmérsékleten – görbültté válik a szivárgó áramok megnövekedése miatt. A záró szerkezet kapacitását döntően a legkisebb kapacitású átmenet kapacitása szabja meg, ezért a működés közben záró irányban előfeszített átmenet rétegeinek töltéshordozó koncentrációját kell elsősorban csökkenteni.

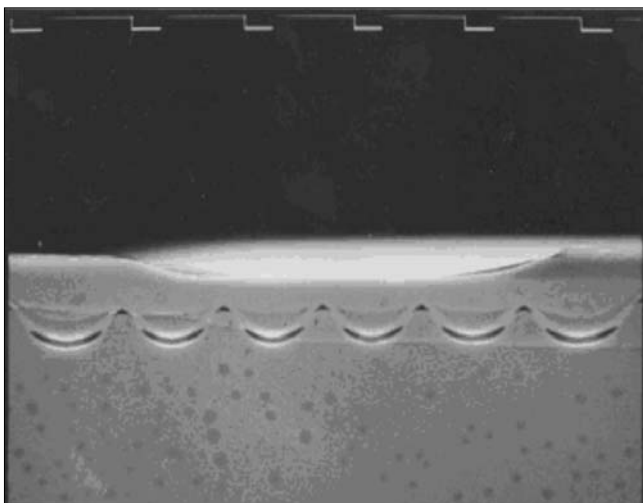
Megállapítottuk, hogy ha az n-InP záró réteg és a p-InP határoló réteg közé egy adalékolatlan réteget építünk, akkor a lézerszerkezet kapacitása alig növekszik a többi záró réteg adalékoltságának növelésével. Ezzel a kettős záróréteget tartalmazó szerkezettel kevesebb mint felére csökkent a lézerek kapacitása a csak $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ töltéshordozó koncentrációjú záróréteget tartalmazó lézerekhez képest.

3.2. Lézersorok sokcsatornás InP hordozón

A sokcsatornás hordozón felépített lézerszerkezetek egyedülálló lehetőséget adnak olyan nagyteljesítményű lézerek készítésére, amelyek egyetlen transzverzális módusban sugároznak, ezért stabil távolférfi sugárzás-eloszlással rendelkeznek. 3- és 5-elemű lézersort készítettünk multimódusú optikai szálakat tartalmazó távközlési rendszerek számára. A 4 illetve 6 csatornát tartalmazó hordozó 3 és 5, egymástól 8 μm távolságban levő keskeny mezacsíkot tartalmazott, amelyen a duplacsatornás lézerszerkezettel azonos rétegsorrendet alakítottunk ki (4. ábra).

4. ábra

SEM felvétel az 5-elemű lézersor hasított és szelektív máróval előhívott felületéről. Az elemek távolsága 8 μm .



A mezák feletti eltemetett kis keresztmetszetű eltemetett aktív réteg csíkok biztosítják az egymódusú működést, a csatornában és a planár részeken elhelyezkedő záró rétegek pedig az áramátfolyást az aktív csíkokra korlátozzák. A tirisztor jellegű záró szerkezet még a mezák közötti csatornában sem nyithat ki, mert kis tiltott sávú InGaAsP rétegeket tartalmaz, amely csökkenti az áramerősítést. A lézersorok egy aktív elemre

számolt küszöbárama a fenti okok miatt megegyezik a legjobb egyelemű szerkezetek küszöbáramával (12 mA). A lézersorokból kivehető maximális teljesítmény nem éri el az egyedi duplacsatornás lézerek teljesítményének 3-, illetve 5-szörösét, de sokkal nagyobb, mint a hasonló szélességű szalaglézereké. A lézersor távolférfi közel szimmetrikus, és a sugárzás kúpszöge független a teljesítménytől.

3.3. Alacsony hőmérsékleten növesztett kettős heteroszerkezetű lézerek felépítése

590°C-on mind a rövid hullámhosszú, mind pedig a hosszú hullámhosszú InGaAsP rétegek szelektívebben növekednek mint 630°C-on, ezért az alacsony hőmérsékleten növesztett lézerszerkezetekben a szeparációs távolságok egyértelműen nagyobbak, mint a 630°C-on növesztettekben. Az alacsony hőmérsékletű növesztés másik előnye, hogy a kvaternerek visszaoldódási hajlama csökken, ezért a rétegszerkezet megválasztása szabadabbá válik. Elméletileg korlátozó tényező, hogy a hőmérséklet csökkenésével a szilárdfázisú elegyedési korlát kiszélesedik, de a lézerépítésnél a gyakorlatban nem tapasztaltam konkrét hatását.

Az 1,3 μm -es duplacsatornás lézeréhez hasonló rétegszerkezetű 1,12-1,22 μm -es és 1,45-1,60 μm -es aktív réteget tartalmazó eltemetett aktív réteget és beépített záró szerkezetet egyaránt tartalmazó félvezető lézerszerkezeteket készítettem. Az alacsony hőmérsékleten növesztett 1,55 μm -es lézerszerkezet szembevető előnyökkel rendelkezett a hagyományos visszaoldásgátló réteggel rendelkező 630°C-on növesztett szerkezethez viszonyítva.

A nagyobb szeparációs távolságok miatt a küszöbárama jelentősen kisebb, a szimmetrikus hullámvezetés miatt kedvezőbb a sugárzás téreloszlása, a visszaoldásgátló réteg hiánya miatt kisebb a szerkezet elektromos ellenállása és valamivel jobb a hővezető képessége. A kevesebb számú réteg egyben a rétegnövesztés nagyobb megbízhatóságát is jelenti. A hosszú hullámhosszú (1,45-1,60 μm -es) alacsony hőmérsékleten növesztett lézerek közös jellemzője, hogy küszöbáramuk kicsi (kb. 20 mA), hatásfokuk pedig a sugárzási hullámhossz növekedésével kissé csökken. Ez a csökkenés a nagyobb hullámhosszú rétegek erősebb visszaoldódási hajlamával magyarázható. A lézerszerkezetekből készített eszközök paramétereit részletesebben az alkalmazások fejezetben foglaljuk össze.

Az 1,12-1,22 μm -es lézerszerkezetek alacsony hőmérsékleten növesztve az 1,55 μm -es lézerhez hasonló felépítést mutattak. A szeparációs távolságok megnövekedése miatt az alacsony hőmérsékleten növesztett szerkezetekből készített lézerek küszöbárama kisebb, mint a 630°C-on növesztetteké.

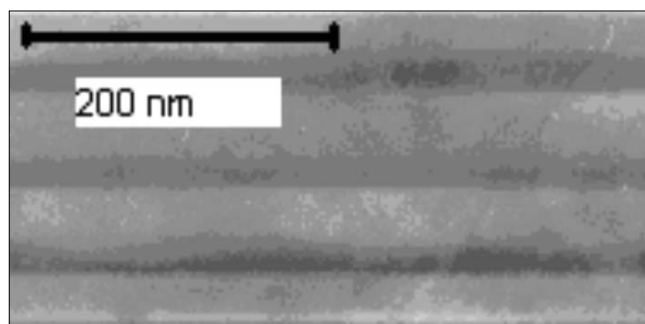
3.4. Eltemetett kvantum-heteroszerkezetes lézerek duplacsatornás hordozón

Az LPE berendezés továbbfejlesztésében és az alacsony hőmérsékleten végzett növesztések során elért eredmények alapján lehetővé vált, hogy az egylépcsős

szerkezetépítés előnyeit kvantumvölgyes lézerek esetében is bizonyítsuk. Egyrészt, az automatikus gyors mozgatás és a szűkíthető olvadékrés segítségével 10 ms-os növesztési idők pontos beállítása is lehetővé vált, másrészt pedig 590°C-on az 1,5 µm-es kvaternerek viszaoldódási hajlama rendkívüli módon lecsökkent, ezért nagyon vékony, éles heteroátmenetekkel rendelkező rétegeket sikerült előállítani. Az eltemetett kvantum-heteroszerkezeteket szintén duplacsatornás hordozón készítettük.

5. ábra

A kvantum-heteroszerkezetes lézer aktív tartományának SEM felvétele. A négy barrier és három aktív réteg együttes vastagsága 200 nm.



A lézerszerkezetben az InP rétegek alakja és sorrendje megegyezik az 1,3 mm-es duplacsatornás hor-

dozójú lézer rétegeivel. A három kvantumvölgyes aktív tartományban a 20 nm vastag 1,55 µm-es InGaAsP rétegeket szintén 20-30 nm vastag 1,16 µm-es barrier rétegek határolják. A rétegszerkezetet a 5. ábra szemlélteti.

A mély kvantumvölgyes és viszonylag vastag rétegeket tartalmazó szerkezetben a töltéshordozók összetartása rendkívül jó, a termikus töltéshordozó „túlfolyás” szinte elhanyagolható. A rétegek száma nem túl nagy, ezért a heteroátmenetek hibái okozta problémák is kevésbé jelentkeznek. A szerkezetben az abszorpciós veszteség a nagyobb tiltott sávú barrier rétegek jelenléte miatt kisebb, mint a hagyományos kettős heteroszerkezetű lézerekben, ezért a hatásfok kevésbé függ a rezonátor hosszától.

Az egylépcsős folyadékepitaxiás módszerrel előállított három kvantumvölgyes lézerszerkezet paramétereit összehasonlítottuk a csak egy aktív rétegből álló hasonló felépítésű lézer paramétereivel. A legjobban szembeötlő különbség a sugárzási hullámhossz megváltozása volt.

Ez az eltolódás megfelelt az elmélet alapján várható értéknek (kb. 14 nm). A 250 mm-es hosszúságú kvantumvölgyes lézer küszöbárama 15 mA, hatásfoka pedig 0,15 mW/mA volt. Mindkét paraméter jobb volt (20, illetve 50%-kal), mint a hasonló kettős heteroszerkezetű lézereké.

1. táblázat

Az MFKI-ban és MFA Kutatóintézetben kifejlesztett GaInAsP/InP félvezető fényforrások főbb jellemzőinek összefoglalása [4, 13, 18-22]

Felhasználási terület	Eszköztípus és hullámhossz [µm]	Főbb paraméterek		
		$I_{th.min}$ [mA]	$\eta_{d.max}$ [mW/mA]	P_{max} [mW]
Optikai távközlés	DCS-BH 1,30-LD	8	0,21	35
	*LC-DCS-BH 1,30-LD	10	0,22	22
	DCS-SC-BH 1,55-LD	24	0,13	17
	*LTC-DCS-BH 1,55-LD	17	0,12	15
Szállézeres pumpálása	HP-DCS-BH 1,12-LD	52	0,34	85
	*HP-DCS-BH 1,15-LD	44	0,37	121
	*HP-DCS-BH 1,22-LD	40	0,40	140
	DCS-3QW-BH 1,5-LD	14	0,17	17
Szelektív spektroszkópia				
vízgőz	LC-DCS-BH 1,37-LD	10	0,21	18
CO, CO ₂	LTC-DCS-BH 1,57-LD	18	0,11	16
Gabona vizsgálat	*LA-1,015-INFRALED	–	0,012	10
	*LA-1,06-INFRALED	–	0,025	15
Orvosi diagnosztika	*LA-1,02-INFRALED	–	0,015	12
	*LA-1,04-INFRALED	–	0,022	15
Vércukor mérés, élelmiszer spektroszkópia	*MFA-INFRALED sor 1000-1700 nm		0,02-0,04	20-100

4. Az eredmények alkalmazása

Az 1. táblázatban felhasználási területek szerint ismertetjük az MFKI-ban kifejlesztett félvezető fényforrásokat, csillaggal jelölve azokat a típusokat, amelyek esetében értékesítés is történt.

A magyar elnevezések kialakulatlanok, mert a szakirodalom szinte kizárólag angol nyelvű és a megrendelőink többsége is külföldi.

A lézertípusok nevei az angol elnevezések szerinti mozaikszavak:

DCS-BH-LD (Double-Channeled Substrate Buried Heterostructure Laser Diode)

- Duplacsatornás hordozójú, eltemetett heteroszerkezetű lézerdíoda

LC (Low Capacity)

- Kis parazita-kapacitású

SC (Separate Confinement)

- Szeparált összetartású

QW (Quantum Well)

- Kvantumvölgyes

LTC (Low Temperature, Capacity)

- Alacsony hőmérsékleten növesztett kis parazita-kapacitású

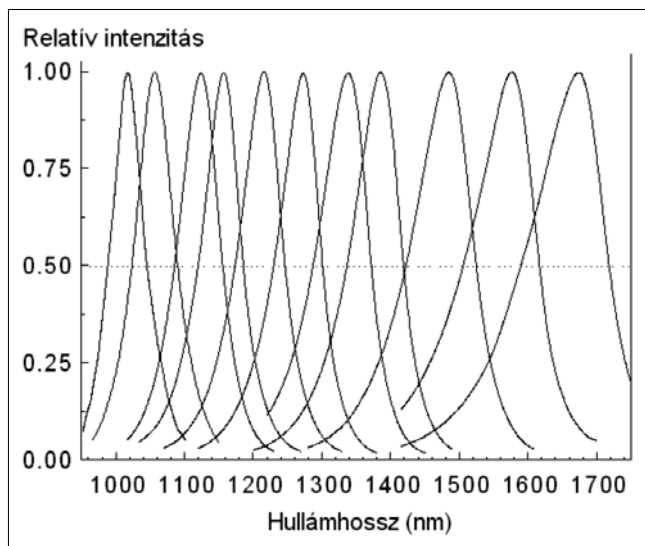
LA (Low Angle)

- Kis kúpszögben sugárzó

HP (High Power)

- Nagy teljesítményű

A lézerek esetén feltüntetett paraméterek folyamatos üzemre, a világító diódáké pedig impulzus üzemű működtetésre vonatkoznak.

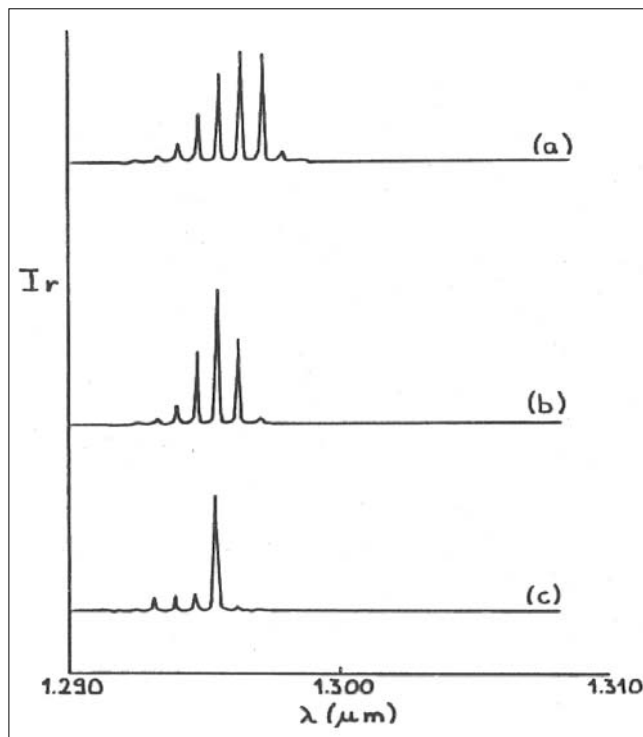


6. ábra

11 LED spektruma lefedi a 900-tól 1700 nm-ig terjedő hullámhossztartományt

A továbbiakban a különböző hullámhosszúságú LED-ek (6. ábra), és néhány tipikus lézer karakterisztika bemutatásával szemléltetjük az elért eredményeket.

A 7. ábra az 1,3 μm -es hullámhosszon sugárzó duplacsatornás hordozójú eltemetett heteroszerkezetű lézer spektrumát mutatja.



7. ábra

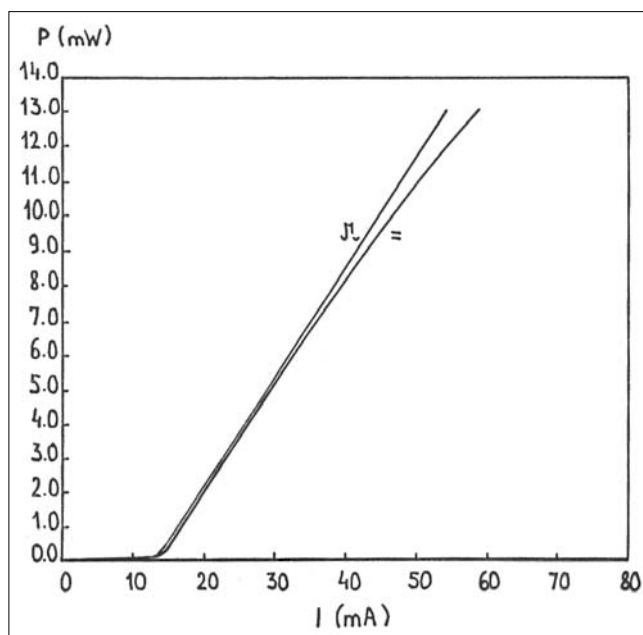
Az 1,3 μm -es hullámhosszon sugárzó InP/InGaAsP duplacsatornás hordozójú eltemetett heteroszerkezetű lézerdíoda spektruma (a= 60 mA, b= 40 mA, c= 20 mA)

A lézerek áram-teljesítmény karakterisztikái széles működési tartományban lineárisak (8. ábra), és magas hőmérsékleten is képesek folyamatos üzemből működni.

Az általunk kifejlesztett lézereknek mind a közeltéri, mind pedig a távolféri sugárzáseloszlása közel szimmetrikus, ezért könnyen csatlakoztathatók optikai szálakhoz.

8. ábra

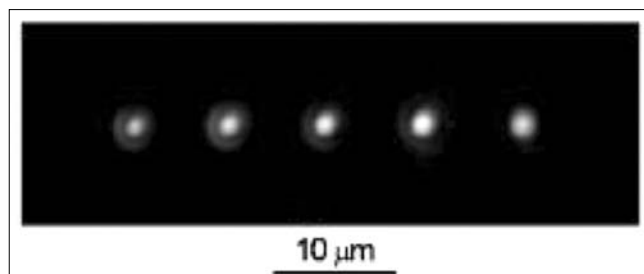
A kommunikációs lézerek jellemző áram-teljesítmény karakterisztikái folytonos és impulzus üzemmódban



A 9. ábra egy ötelemű lézersor közelítéri sugárzás-eloszlását mutatja éppen a küszöbáram elérésekor. A szélső elemek távolsága $40\text{ }\mu\text{m}$, ezért az ilyen lézersor sugárzása hatékonyan csatlakoztatható az $50\text{ }\mu\text{m}$ magátmérőjű multimódusú szálakba.

9. ábra

Az ötelemű lézersor közelítéri sugárzáseloszlása



Irodalom

- [1] M. Hirao, S. Tsui, K. Mizuishi, A. Doi, M. Nakamura: Journal Opt. Commun. 1, 10. (1981)
- [2] Lendvay Ödön:
Félvezető lézerek. Az elektronika újabb eredményei, 2. kötet, szerk.: Pap László, Akadémiai Kiadó, Budapest (1985)
- [3] Lajtha György, Szép Iván:
Fénytávközlő rendszerek és elemeik. Budapest (1987)
- [4] L. Bartha, F. Koltai, S. Püspöki, V. Rakovics, M. Serényi:
Proc. of 19th Int. Semiconductor Conference, CAS'96, 9-12 October 1996, Sinaia, Romania, Vol.1, p.197.
- [5] H.C. Casey, Jr.:
Journal of Applied Physics 49, p.3684. (1978)
- [6] M. Ettemberg, H. Kressel:
Journal of Applied Physics 43, p.1204. (1972)
- [7] R.F. Murison, A.J.N. Houghton, A.R. Goodwin, A.J. Collar, I.G.A. Davies:
Electron. Letters 23, p.601. (1987)
- [8] H. Horikawa, S. Oshiba, A. Matoba, Y. Kawai:
Applied Physics Letters 50, p.374. (1987)
- [9] T. Murotani, E. Oomura, H. Namizaki, W. Susaki:
Electron. Letters 16, p.566. (1980)
- [10] H. Ishikawa, H. Imai, I. Umberto, K. Hori, K. Takusagawa:
Journal of Applied Physics 53, p.2851. (1982)
- [11] I. Mito, M. Kitamura, K. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, Y. Odagiri, H. Nishimoto, M. Yamaguchi, K. Kobayashi:
IEEE Journal Lightwave Techn. 1, p.195. (1983)
- [12] V. Rakovics, M. Serényi, F. Koltai, S. Püspöki, Z. Lábadi:
Material Science & Engineering, B28, p.296. (1994)
- [13] R.J. Nelson, P.D. Wright, P.A. Barnes, R.L. Brown, T. Cella, R.G. Sobers,
Applied Physics Letters 46, p.358. (1980)
- [14] K. Kishino, Y. Suematsu, Y. Itaya:
Electron. Letters 15, p.134. (1979)
- [15] K. Moriki, K. Wakao, M. Kitamura, K. Iga, Y. Suematsu:
Jpn. Journal Applied Physics 19, p.2191. (1981)
- [16] M. Sugimoto, A. Suzuki, H. Nomura, R. Lang:
Journal Lightwave Technology 2, p.496. (1984)
- [17] S. Püspöki, V. Rakovics, F. Koltai, M. Serényi:
Semicond. Science and Techn. 11, p.1468. (1996)
- [18] V. Rakovics, G. Nagy, F. Koltai, S. Püspöki, M. Serényi, C. Frigeri, F. Longo:
Proc. of 8th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 21-25 April 1996, Schwabisch Gmünd, Germany, p.459.
- [19] V. Rakovics, M. Serényi, S. Püspöki:
Physica E 23, p.334. (2004)
- [20] V. Rakovics, J. Balázs, S. Püspöki, C. Frigeri:
Material Science and Engineering B80, p.18. (2001)
- [21] V. Rakovics, S. Püspöki, J. Balázs, I. Réti, C. Frigeri:
Mater. Science and Engineering B91-92, p.491. (2002)
- [22] V. Rakovics, J. Balázs, I. Réti, S. Püspöki, Z. Lábadi:
Physica Status Solidi (C) 0, No.3, p.956. (2003)

Makyoh-topográfia: egyszerű és hatékony eljárás félvezető szeletek simaságának vizsgálatára

RIESZ FERENC, LUKÁCS ISTVÁN ENDRE, SZABÓ JÁNOS, MAKAI JÁNOS,
PÓDÖR BÁLINT, RÉTI ISTVÁN, SZENTPÁLI BÉLA, EÖRDÖGH IMRE

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
riesz@mfa.kfki.hu

LACZIK ZSOLT

Department of Physics, University of Oxford

Lektorált

Kulcsszavak: félvezető-technológia, felületi simaság, optikai metrológia

A cikk egy ősi elvű optikai vizsgálati eljárás, a Makyoh-topográfia területén az Intézetünkben végzett kutatásokat ismerteti. Az ismertetett módszer félvezető szeletek és más tükörjellegű felületek simaságának kvalitatív és korlátozott kvantitatív vizsgálatára alkalmas.

1. Bevezetés

A félvezető eszközök alapanyagául hibamentes, lehetőleg tökéletesen sík egykristály szelet szolgál. A szeletek felületének síktól való eltérése meggátolhatja a további megmunkálás egyes lépéseit, vagy rontja az adott megmunkálási folyamat paramétereit. Ezért mind a szeletgyártók, mind a felhasználók részéről jelentős érdeklődés mutatkozik olyan érintésmentes, nagy pontosságú, tiszta és gyors módszerek iránt, amelyekkel a kiinduló szeletek geometriai, topográfiai hibái minél előbb – akár már a felhasználás előtt – kimutathatóak.

A felület síkságának mérésére számos módszer használatos. Tapintótűs eljárással a felületi domborzat nagy pontossággal mérhető, de a módszer lassú, mechanikai mozgatót igényel és a túl a felület károsodását is okozhatja. Az érintésmentesség igényét az optikai módszerek [1] elégítik ki, ilyenek a lézeres pásztázás és a különféle topografikus – főként interferometrikus – eljárások. A nagy méretű vizsgált felületek esetében ezek a mérések nehezen valósíthatók meg.

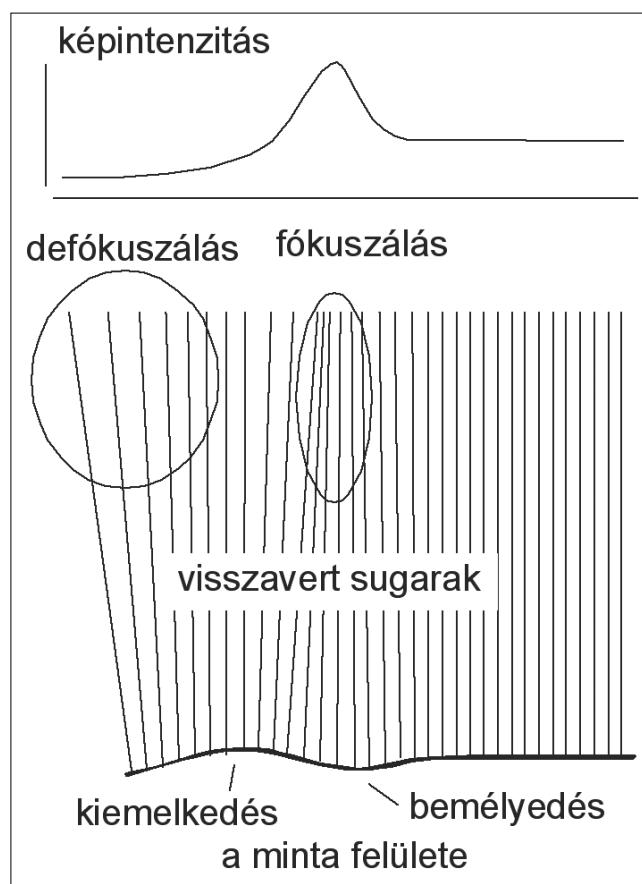
A 70-es évek végén új alternatív vizsgálati módszerként jelent meg az ősi japán varázstükör [2] modern adaptációjaként a Makyoh-topográfia [3,4] (a Makyoh japán szó, jelentése: varázstükör). Az eljárás működési elve a következő: a vizsgált szeletet homogén, kollimált fénynyaláb világítja meg, majd a visszaverődő fényt egy, a szelettől adott távolságban levő ernyő fogja föl. A felület mikrodeformációinak következtében az ernyőn létrejön egy, a felületre jellemző intenzitás-eloszlás, amelyből következtetni lehet a felület topográfiájára (1. ábra).

A gyakorlatban az elemi elrendezéssel optikailag egyenértékű, CCD kamerát és egyéb optikai elemeket tartalmazó elrendezések használatosak. A módszer szinte megkapó egyszerűsége számos kutatóhelyet és gyártót ösztönzött az alkalmazásra. Az eljárást az 1990-es évektől kezdve már elterjedten alkalmazták elsősorban szeletek válogatására és a csiszolási-polírozási technológia minősítésére [4-6]. A berendezés felépítése rend-

kívül egyszerű, nagy felületekre való kiterjesztése könnyen megoldható és a módszer nagy érzékenységgel, valós időben képes képet adni a vizsgált felület felületi hibáiról, nagy hátránya viszont, hogy eredeti megvalósításában kvantitatív vizsgálatokra nem alkalmas.

A jelen cikk célja a Makyoh-topográfia témájában az MFKI-ban, majd a jogutód MFA-ban folyó alap- és alkalmazott kutatások rövid, szemelvényes jellegű bemutatása.

1. ábra A Makyoh-topográfia képalkotásának vázlata



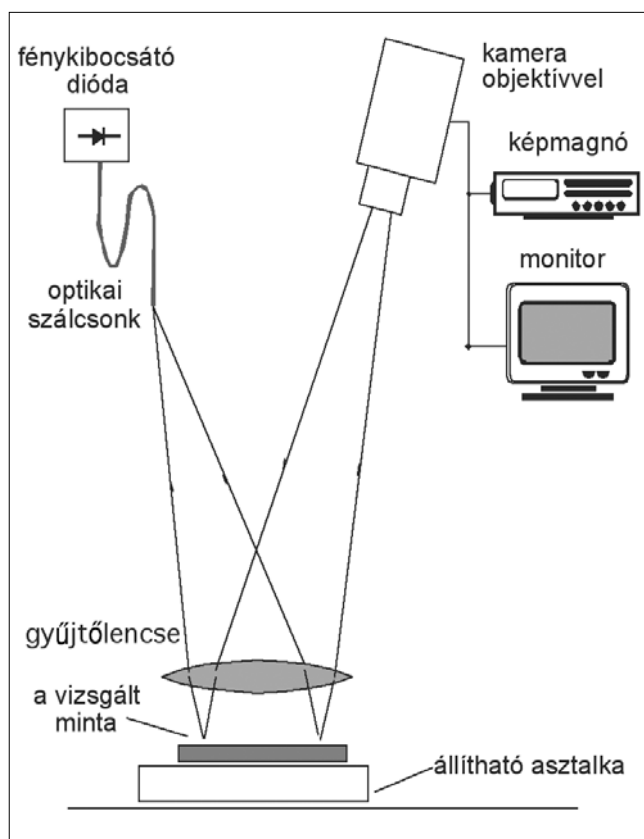
2. Kezdeti lépések

Az MFKI-ban a módszerrel kapcsolatos kutatások a 90-es évek elején kezdődtek. Az MFKI-ban megépített berendezés [7] vázlata a 2. ábrán látható.

Az eszköz fényforrása egy optikai szálcsonkkal ellátott LED (hullámhossz 820 nm), amely 50 µm átmérőjű fényfoltot biztosít. A minta fölött egy nagy átmérőjű, 500 mm fókusztávolságú gyűjtőlencse helyezkedik el; ez kollimátorként szolgál a fényforrás, és nagyítólencseként a kamera számára. A minta maximális mérhető területét a lencse átmérője 75 mm-re korlátozza. A nyert képeket képmagnóra rögzítettük.

2. ábra

Az MFKI-ban felépített első Makyoh-topográfias berendezés vázlata



A GaAs alapú eszközöknek az MFKI Mikrohullámú Eszközök Főosztályán folyó kutatása és gyártása, valamint nemzetközi kapcsolataink bőségesen szolgáltattak próbatesteket a vizsgálatokhoz [8, 9]. E vizsgálatok – az akkori irodalmi adatokkal összhangban – még megmaradtak a kvalitatív értelmezés keretein belül.

A 3. ábra jellegzetes felvételein megfigyelhető közel párhuzamos ívekből álló mintázat feltehetőleg fűrészelési nyomra, a periodikus, sötét pöttyök durva morfológiára utalnak; a nagy kiterjedésű, lassan változó kontraszt pedig a szelet nagyléptékű deformációját jelzi.

3. A képképzés alapjai

Mivel a számszerű eredményeket szolgáltatató mérés nemcsak természetes igény, hanem a korszerű technológiaminősítés alapvető követelménye, további kutatásaink a Makyoh-topográfia képképzésének a vizsgálatára irányultak. Mivel minden Makyoh-topográfias rendszerhez található egy olyan, optikailag ekvivalens rendszer, amely – egy nagyítási tényezőtől eltekintve – kollimált fényű megvilágításból és egy távoli felfogó ernyőből áll, a leképezést egyetlen paraméter, az ekvivalens minta-ernyő távolság jellemzi (továbbiakban L) [10,11].

A képképzés geometriai optikai modelljét a [12] cikkben ismertettük részletesen. Itt csak a végeredményt közöljük. A vizsgált $h(\mathbf{r})$ felület egy adott $\mathbf{r}$ pontjából visszavert fénysugár $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ pozícióját az ernyőn az alábbi összefüggés adja meg (kis beesési szög, azaz viszonylag egyenletes felület esetén):

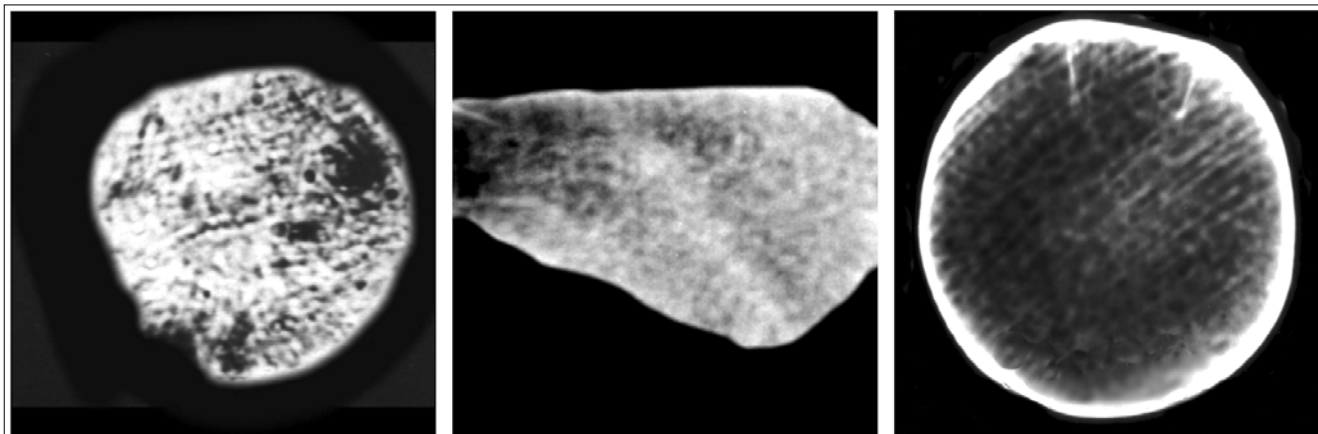
$$\mathbf{f}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} - 2L \text{grad } h(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Ez az egyenlet a visszaverődési törvényből triviálisan következik: a visszavert fénysugárnak a feltételezett sík mintafelülethez képesti eltolódása a felület adott pontjában mért gradiensével arányos.

Az $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ pont relatív (sík, egységnyi reflektivitású felület esetében mérhetőhöz viszonyított) $I(\mathbf{f})$ fényintenzitását pedig a következő összefüggés írja le:

$$I(\mathbf{f}) = \frac{\rho(\mathbf{r})}{|(1 - 2LC_{\min}) (1 - 2LC_{\max})|}, \quad (2)$$

3. ábra Félvezető szeletek jellegzetes Makyoh-képe



ahol $p(r)$ a felület lokális reflektivitása, $C_{\min}$ és $C_{\max}$ pedig a minta felületének lokális minimális, illetve maximális görbületei. A visszavert sugár intenzitását tehát a felület másodrendű tulajdonságai határozzák meg.

A fenti egyenletekből következik, hogy kis $|L|$ mellett a mintafelület egy adott pontja és a pont képe közel lesz egymáshoz (a mintát és az ernyőt azonos síkba képelve) és a képkontraszt fő összetevőjét a felület reflexiós tényezőjének az inhomogenitása adja. Növekvő $|L|$ megnöveli a pont és képe közti távolságot és a kép kontrasztját is, elnyomva a felület egyenetlen reflexiójából eredő kontraszt-összetevőt. A legkedvezőbb beállítás tehát $|L|$ -nek abban a közepes tartományában van, amelyik elegendően nagy kontrasztot eredményez a megbízható megfigyeléshez, ugyanakkor a felületi struktúra integritása is megőrződik a képen.

Bár a fenti geometriai optikai leírás csak közelítő, a gyakorlati esetekben mégis kielégítő leírást ad. Diffrakciós jelenségek ugyanis akkor kerülnek előtérbe, amikor a képsík egy pontjában sok sugár találkozik, vagy élek, nyílások stb. árnyéka mentén. A gyakorlatban a vizsgált félvezető szeletek reflexiója nem mutat erős egyenetlenségeket és a leképezés legkedvezőbb tartománya éppen az, ahol fókuszálási hatások nem jelentkeznek, így a geometriai optikai modell valóban megfelelő.

4. Kvantitatív Makyoh-topográfia

Bár a Makyoh-topográfia leképezési törvényei egyszerűek, a leképezést leíró egyenletek nem invertálhatók, ezért a felületi Makyoh kép alapján a felületi domborzat meghatározása általános esetben analitikusan nem lehetséges [13]. Ha a homogén megvilágítást azonban valamilyen maszk segítségével strukturáljuk, ezzel mintegy „megjelöljük” a felület bizonyos pontjait. Így az (1) egyenlet alapján a felület gradiense a megjelölt pontokban meghatározható, ha ismerjük az ideális sík felülethez tartozó pozíciót. A (2) egyenlet ekkor feleslegessé válik. A strukturálás legcélszerűbb megvalósítása egy négyzetháló mintájú maszkkal történhet. A $h(x, y)$ felületi domborzat a következő integrálközelítő összeggel számítható ki a rácspontokban [13]:

$$h(x, y) = \frac{1}{2L} \sum [\Delta x(x_i - f_{xi}) + \Delta y(y_i - f_{yi})] \quad (3)$$

Itt Δx és Δy a háló celláinak a mérete, (f_x, f_y) pedig az (x, y) hálópont képének a koordinátái. Az (x_i, y_i) az ideális síkhoz tartozó koordinátákat jelöli, amelyeket egy referenciakörrel elvégzett méréssel határozhatunk meg. Az összegzés egy kezdőpontból kiindulva történik; e kezdőpont h magassága önkényesen megválasztható. Az összegzés útja elvben önkényesen választható meg, hiszen minden, adott kezdő- és végpontú út mentén kiszámított összeg ugyanazt az eredményt kell hogy adja. A gyakorlatban azonban a rács véges felbontása miatt az integrálközelítő összeg hibája függ az útvonaltól és mértéke általában nem jósolható meg.

A módszer hibáját jelentősen csökkenthetjük, ha az összes (pontosabban célszerűen a kezdőpont és a mért pont által meghatározott téglalapon belüli) lépésben bejárható útra elvégezzük az összegzést, és a kapott magasságértékeket átlagoljuk. Ez viszont igen hosszú számítási időt vesz igénybe már egy kisebb négyzethálón is. Ezért kidolgoztunk egy rekurzív algoritmust, amely az előbbi eredményt adja, de jóval gyorsabban [14-15].

A háló rácspontjainak meghatározására megalkotunk egy algoritmust, amelynek lényege, hogy a Makyoh-képen „végigfuttatunk” egy kereszt alakú súlyfüggvényt és meghatározzuk a kép adott részének, valamint a súlyfüggvénynek a korrelációját. A korrelációs függvény lokális maximumainak megkeresésével a rácspontok koordinátái tört pixel pontossággal meghatározhatóak.

A leírt módszer automatizálható, egyszerű és gyors (50x50 méretű rács esetén gyakorlatilag valós idejű) kvantitatív vizsgálatokat enged meg. Fontos megjegyezni, hogy – feltéve, hogy a rácsvonalak sokkal vékonyabbak a rácsperiódusnál – a Makyoh-kép továbbra is mutatja a kisebb méretű felületi hibák okozta kontrasztváltozást. Ez a tulajdonság megfelel a félvezető-technológia minősítési igényeinek, ugyanis a szeletek topográfiája a leggyakrabban egy lassan változó deformáció (görbület, vetemedés) és lokalizált hibák (csiszolási, polírozási hibák stb.) szuperpozíciójából áll. Célszerű, ha a rács képe közelítőleg éles. Ez a 2. szakaszban leírt összeállítással megvalósítható.

Az integrálközelítő összegzés útfüggés okozta hibája kiküszöbölhető egy iteratív eljárás, az úgynevezett relaxációs módszer alkalmazásával [15,16]. A módszer jóval pontosabb, mint az összegzéses közelítés, hátránya viszont, hogy mivel iteratív, lassabb; valós idejű mérésekre nem alkalmas.

5. Alkalmazások

5.1. Integrált áramkörök hordozóról való eltávolítása során fellépő deformációk vizsgálata

Napjainkban a félvezetőipar egyik dinamikusan fejlődő ága a félvezető szeletek újrahasznosítása (angolul: wafer reclaim). A nagy átmérőjű szeletek rendkívül drágák, viszont bizonyos célokra megfelelnek a technológiából kiesett és újrahasznosításra alkalmassá tett szeletek. Hasonló megfontolások érvényesek az új, költséges technológiájú vegyület-félvezetők (pl. SiC, GaN). A szeletviasszanyerés magában foglalja a már kialakított áramkörti rétegek eltávolítását és a szelet újracsiszolását.

Intézetünkben egy olyan modellkísérletet végeztünk el [17], amelynek célja az újrahasznosítás egyes lépéseinek hatására bekövetkező deformációváltozás vizsgálata és azok okainak kiderítése. A kísérlet során 2 hüvelyk átmérőjű, áramköröket tartalmazó SiC szeletek deformációit vizsgáltunk meg az egyes rétegek eltávolítása után.

Megmutattuk, hogy az áramkörök funkcionális leválasztott rétegeinek (oxid vagy fémezés) eltávolítása a szelet görbületének egyenletes változását eredményezi, míg az utolsó lépésként alkalmazott csiszolás egyenletlen deformációt okoz, amely függ az eredeti deformáció mértékétől és a csiszolási eljárás paramétereitől. A minták polírozás utáni vizsgálata során megállapítottuk, hogy az eredetileg viszonylag sík felületű szeletek síkok, míg az egyenletesen görbült szeletek egyenletesen görbültek maradtak.

Értelmezésünk szerint ennek oka az, hogy polírozáskor a mintáknak az őket megtámasztó fémtömbre való felragasztásakor a görbült szeletek az alkalmazott nyomás hatására „kiegyenesedtek”, majd a polírozás végeztével ez a feszültség megszűnt, így visszanyerték eredeti alakjukat. Ezzel szemben a polírozás előtt szabálytalan alakot mutató szeletek domborzata megváltozott és az új profil semmilyen korrelációban sem volt az eredeti alakkal. Ezek a deformációk feltehetően a polírozási művelet hiányosságaira utalnak.

5.2. Mikroépeszeti (MEMS) szerkezetek deformációjának a vizsgálata

Bár a Makroh-topográfia elsősorban nagy méretű felületek vizsgálatára alkalmas, és az erősen strukturált

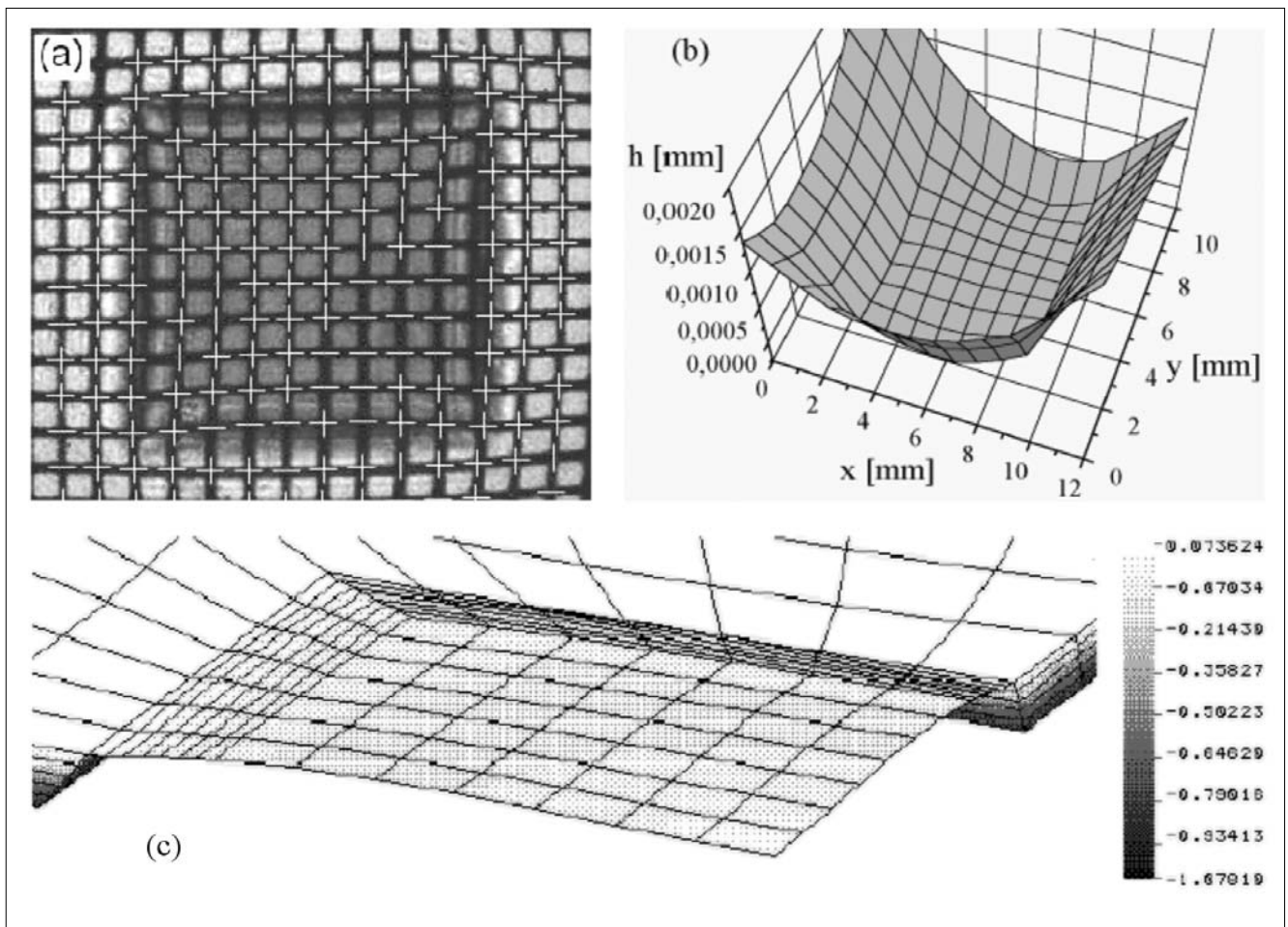
MEMS minták esetében jelentős diffrakciós hatásokkal is számolnunk kell, bizonyos egyszerűbb esetekben a módszer eredményesen alkalmazható.

Si/SiN_x anyagú, 4-10 mm oldalhosszúságú négyzet alakú membránok deformációját vizsgáltunk [18]. Az elkészített membránok közepének kiemelkedését összehasonlítottuk a végeelem-módszerrel végzett számításokkal is, abból a célból, hogy meghatározzuk a SiN_x hőtágulási együtthatóját.

A membránok középpontjának kiemelkedésére a szimulációval és a Makroh-méréssel kapott eredmények között igen jó egyezést találtunk, ha a szimulációban a SiN_x hőtágulási együtthatóját $2,62 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ -re állítottuk be. Kiemeljük, hogy a membránok középpontjának a kiemelkedése $0,1 \mu\text{m}$ alatti volt, ami a Makroh-topográfia és a hőtágulási együttható mérésének nagy érzékenységet mutatja.

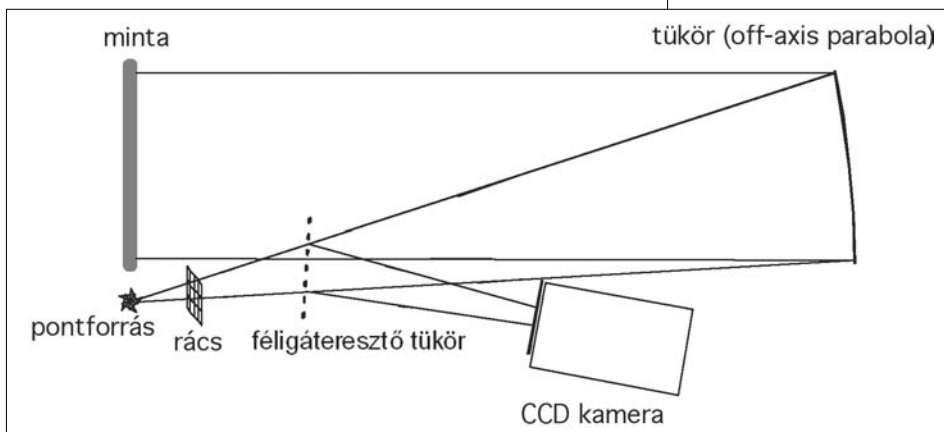
A 4. ábrán a megfelelő Makroh-kép, a kiértékelt domborzati térkép és egy jellegzetes szimulációs eredmény látható. A mért Makroh-topogram szerint az egyébként domború membrán közepén egy sekély ($\approx 0,01 \mu\text{m}$) bemélyedés található, amit a szimulációs modell jól reprodukált. A hordozó membrán-környéki deformáltsága szintén megfigyelhető mind a Makroh-topogramon, mind a szimuláció eredményén.

4. ábra Egy 10 mm x 10 mm-es SiN_x membrán
a) Makroh-képe a meghatározott rácspontokkal, b) a kiszámított profil és
c) végeelem-módszerrel szimulált kétdimenziós profilja (a magassági adatok μm -ben).



6. Új kísérleti elrendezések: tükör alapú összeállítás és a DMD

A 2. szakaszban leírt mérési összeállítás legnagyobb hátránya, hogy nagy átmérőjű minták vizsgálatára nem, vagy csak jelentős korlátozásokkal alkalmas. Ugyanis a kollimátor/nagyító lencse nem készíthető tetszőlegesen nagy méretben lencsehibák nélkül. Ennek a problémának a megoldására tükör alapú rendszert terveztünk és építettünk meg [19-22]. Az elrendezés az 5. ábrán látható.



5. ábra
Tükör alapú Makyoh-topográfias rendszer vázlata

Az „off-axis” elrendezésben használt parabolatükör miatt nincs szférikus aberráció, a nyalábosztó alkalmazása miatt a leképezés parallaxismentes. A parabolatükör átmérője 300 mm, fókusz távolsága 1524 mm. L értéke kb. 0 és 5500 mm között szabályozható a kamera objektívjének távolságbeállításával. Ezzel a berendezéssel egy korszerű, érzékeny, nagy dinamikai tartományú, széleskörűen alkalmazható eszköz birtokába jutottunk. Az elrendezés legnagyobb előnye a méretbeli skálázhatóság: 450 mm átmérőjű, $\lambda/20$ felületi minőségű off-axis parabolatükrök kereskedelmi forgalomban kaphatók. Alternatív elrendezésként a megvilágító és a detektáló fényútban külön-külön gömbtükröket tartalmazó összeállítást is építettünk és demonstráltuk működését [20]. Ezen összeállítás előnye a parabolatükörök rendszerhez képest a kisebb költség.

A „vetített rácsos” változat legnagyobb hátránya a rossz laterális felbontás: a rácsnak a rácsponthoz tartozó területének érdekében ugyanis kellően ritkának kell lennie. A laterális felbontás sokszorosára növelhető mozgatható rács és szekvenciális felvételek alkalmazásával; ekkor a rácsot az egyes felvételek között a rácsperiódus törtrészával mozgathatjuk, így lényegében egy kis (az elmozdítással megegyező) periódussal rendelkező „szuperrácsot” kapunk. A valós idejű mérés természetesen nem valósítható meg. A megvalósításhoz a legegyszerűbb vezérelhető tükrömátrixot (DMD, Digital Micromirror Device) használni. A DMD mátrixba rendezett, egyedileg címezhető, átlójuk mentén két helyzetbe billenthető tükrökből áll. (Ilyen eszközöket használnak például a DLP típusú projektorokban.)

A hagyományos rögzített mintájú maszknál finomabb mintázat miatt itt még fontosabb, hogy a rács képe a Makyoh-képen éles legyen, és mivel ez a tükrös rendszerrel nehezebben valósítható meg, a DMD-t egy két gyújtólencséből álló teleszkópos megvilágító rendszerbe illesztettük. Az összeállítás első (még lencse alapú) változata az Oxfordi Egyetemen épült meg [16], ezzel 0,7 mm laterális felbontást értünk el és a körülbelül 7 μ m teljes magasságváltozásra vetítve maximum 10% eltérést észleltünk az interferometriával nyert eredményhez képest.

A DMD alkalmazása a Makyoh-topográfiában új perspektívákat nyit meg [21]. A leírt eltolt rácsú mérésen kívül lehetőség nyílik bármilyen tetszőleges periódusú rács (sőt, egyéb mintázat) megvalósítására, ezzel a mérési sebesség és a laterális felbontás közötti kompromisszum igény szerint meghatározható.

7. Összefoglalás

Az ismertetett kutatás egy már ismert és alkalmazott vizsgálati módszer alapjainak a tisztázásához járult hozzá: az egykori „mágikus” jelenségből megértett, szerteágazó feladatokra sokoldalúan alkalmazható, az ipari alkalmazások kapuját döngető eljárás lett.

A további alkalmazásokkal és egyéb vonatkozásokkal kapcsolatban az irodalomra [23-25], valamint a kutatási téma honlapjára (www.mfa.kfki.hu/~riesz/makyoh/) utalunk.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik a következő munkatársaik segítségét:
Bársony István, Chalupa János, Dücső Csaba,
Erős Magdolna, Fürjes Péter, Gubics János,
Karányi József, Németh Tiborné, Somogyi Károly,
Szász Károly, Tunyogi Erika és Vízváry Zsolt.

A kutatómunkát támogatták:
Országos Tudományos Kutatási Alap
(F 25224, T 037711 és M 041735 sz. szerződések),
Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (Riesz Ferenc),
KPI (GVOP-3.2.1.-2004-04-0337/3.0. sz. szerződés),
Európai Unió (MEMSWAVE, INCO-Copernicus, 977131 sz. szerződés és HYPHEN, FP6-027455 sz. szerződés),
The Royal Society of London.

Irodalom

- [1] Muller T., Kumpe R., Gerber H.A., Schmolke R., Passek F., Wagner P.:
Techniques for analysing nanotopography on polished silicon wafers,
Microel. Engin. 56. (2001), p.23.

- [2] Riesz F.:
Egy 2000 éves elv a csúcstechnológiában – A japán varázstükör,
Élet és Tudomány 55. (2000), p.41.
- [3] Kugimiya K:
Makyoh: The 2000 year old technology still alive,
Journal Crystal Growth 103. (1990), p.420.
- [4] Blaustein P., Hahn S.:
Realtime inspection of wafer surfaces,
Solid State Technol. 32. (1989), p.27.
- [5] Tokura S., Fujino N., Ninomiya M., Masuda K.:
Characterization of mirror-polished silicon wafers by Makyoh method,
Journal Crystal Growth 103, (1990), p.437.
- [6] Pei Z.J., Xin X.J., Liu W.:
Finite element analysis for grinding of wire-sawn silicon wafers: a designed experiment,
Int. Journal Machine Tools Manufact. 43 (2003), p.7.
- [7] Szabó J., Makai J.:
Tükörjellegű felületek vizsgálata Makyoh módszerrel, Elektron. technológia, mikrotechnika 32. (1993), p.15.
- [8] Németh-Sallay M., Minchev G.M., Pődör B., Pramatarova L.D., Szabó J., Szentpáli B.:
Investigation of the surface preparation of GaAs substrates for MBE and VPE with whole sample optical reflection,
Journal Cryst. Growth 126. (1993), p.70.
- [9] Minchev G.M., Pramatarova L.D., Pődör B., Szabó J.:
Experimental confirmation of the peculiar behavior of the coherent-type twin boundaries in sphalerite crystals,
Crystal Research and Technology 29. (1994), p.1131.
- [10] Riesz F.:
Camera length and field of view in Makyoh-topography instruments,
Review of Scientific Instruments 72. (2001), p.1591.
- [11] Szabó J., Riesz F., Szentpáli B.:
Makyoh topography: curvature measurements and implications for the image formation,
Jpn. Journal Applied Physics 35. (1996), L258.
- [12] Riesz F.:
Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography,
Journal Physics D: Applied Physics 33. (2000), p.3033.
- [13] Riesz F., Lukács I.E.:
Possibilities of quantitative Makyoh topography,
Proc. of 3rd International EuroConf. Advanced Semiconductor Devices and Microsys., 16-18 October 2000, Smolenice, Editors: Osvald J., Hascík S., Kuzmík J., Breza J., IEEE, Piscataway (2000), p.215.
- [14] Lukács I. E., Riesz F.:
Error analysis of Makyoh-topography surface height profile measurements,
Eur. Phys. Journal – Appl. Phys. 27. (2004), p.385.
- [15] Riesz F., Lukács I.E.:
Sensitivity and measurement errors of Makyoh topography,
Physica Status Solidi (A) 202. (2005), p.584.
- [16] Lukács I.E., Riesz F., Laczik Z.J.:
High spatial resolution Makyoh topography using shifted grid illumination,
Physica Status Solidi (A) 195. (2003), p.271.
- [17] Lukács I.E., Riesz F.:
Makyoh-topography assessment of etch and polish removal of processed circuits for substrate re-use,
Microel. Engin. 65. (2003), p.380.
- [18] Lukács I.E., Vízváry Zs., Fürjes P., Riesz F., Dücső Cs., Bársony I.:
Determination of deformation induced by thin film residual stress in structures of millimetre size,
Adv. Eng. Mater. 4. (2002), p.625.
- [19] I.E. Lukács, J.P. Makai, F. Riesz, I. Eördögh, B. Szentpáli, I. Bársony, I. Réti, A. Nutsch,
Wafer flatness measurement by Makyoh (magic-mirror) topography for in-line process control,
Proc. 5th European Advanced Equipment Control / Advanced Process Control (AEC/APC) Conference, 14-16 April 2004, Dresden, Germany, p.514.
- [20] Makai J.P., Riesz F., Lukács I.E.:
Practical realizations of the Makyoh arrangement for the investigation of large area mirror-like surfaces,
3rd International Conference on Metrology [CD-ROM], 14-16 November 2006, Tel Aviv, Israel.
- [21] Riesz F., Lukács I.E., Makai J.P.:
Realisation of quantitative Makyoh topography using a Digital Micromirror Device,
SPIE Europe Optical Metrology, 17-21 June 2007, Munich; Proc. of SPIE, Vol. 6616., Paper 66160L.
- [22] Lukács I.E., Makai J.P., Pfitzner L., Riesz F., Szentpáli B.:
Apparatus and measurement procedure for the fast, quantitative, non-contact topographic investigation of semiconductor wafers and other mirror like surfaces,
European Patent EP 1 434 981 B1, 5 July 2006.
US Patent 7,133,140 B2, 7 November 2006.
- [23] Riesz F.:
Makyoh topography for the morphological study of compound semiconductor wafers and structures,
Mater. Science and Engineering B 80 (2001), p.220.
- [24] Lukács I.E., Riesz F.:
A simple algorithm for the reconstruction of surface topography from Makyoh-topography images,
Crystal Res. Technol. 36. (2001), p.1059.
- [25] Lukács I.E., Fürjes P., Dücső Cs., Riesz F., Bársony I.:
Process monitoring of MEMS technology by Makyoh topography,
Proc. of 13th Micromechanics Europe Workshop (MME'2002), 6-8 October 2002, Sinaia, Romania, p.283.

PIII napelemek beltéri alkalmazása

KUTHI EDVÁRD, PINTÉR ISTVÁN, MOHÁCSY TIBOR, ÁDÁM ANTALNÉ,
SZENTPÁLI BÉLA, BÁRSONY ISTVÁN

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
kuthi@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: napelem, c-Si, PIII, beltéri világítás, kevert fény

A cikk a PIII (Plazma Immerziós Ionimplantáció) eljárással adalékolt kristályos Si napelemek területén elért legújabb kutatási eredményeket mutatja be. Összehasonlítjuk az amorf Si és a hagyományos kristályos Si napelemet az általunk beltéri világításra tervezett kristályos Si napelemmel különböző fényviszonyok között. Megmutatjuk, hogy a valós körülmények között gyakori kevert fényű megvilágítás esetén az általunk kifejlesztett kristályos Si beltéri napelem cella ígéretesen teljesít.

1. Bevezetés

A beltéri napelemek alkalmazása egyre fontosabbá válik az alacsony fogyasztású vezetékmentes eszközök energiaellátásának biztosításában. Az ilyen felhasználások esetén fontos követelmény a felhasznált felület minimalizálása és a beltéri fény minél hatékonyabb energia átalakítása. Jelenleg a legjobban elterjedt beltéri fényforrás a fluoreszcens lámpa. Az ilyen lámpák fényspektruma jól illeszkedik az amorf szilícium (a-Si) napelemek érzékenységi görbéjéhez [1]. Napfény spektrumára azonban, még ha üveglapon is halad keresztül, az a-Si napelemek érzékenysége igen alacsony. Egy ablakkal rendelkező szobában a napelemre érkező fény a szűrt kültéri napfénynek és a szobavilágítás fluoreszcens fényének a keveréke. Ezen megvilágítási környezetben az ultravékony emitterű kristályos szilícium napelem megfelelő eszköz lehet.

Ilyen beltéri megvilágítási feltételekhez – mikor például a mesterséges fény spektruma keveredik az alacsony intenzitású szűrt napfényvel – a napelemeket speciálisan kell megtervezni. A fluoreszcens fénycsövek fényemissziójának legintenzívebb része a 400-700 nm közötti fényhullámhossz tartományba esik [2], míg a napfény energiája köztudottan ennél jóval szélesebb spektrumban oszlik el, adott esetben gyenge háttérfényként. Ezen okok miatt a beltéri napelemeknek a kék spektrális tartományban érzékenyebbeknek kell lenniük. Ebben a cikkben a beltéri kristályos szilícium napelem technológia fejlesztését és a cellák vizsgálati eredményeit mutatjuk be.

A napelemeknek nagyon vékony emitter réteggel kell rendelkezniük, megfelelő antireflexiós réteggel és újra át gondolt fémezéssel. Ráadásul szembesülnünk kell a felületi rekombináció erősebb befolyásával, mivel a fényintenzitás nagyságrendekkel kisebb, mint a kültérre jellemző megvilágítás esetén.

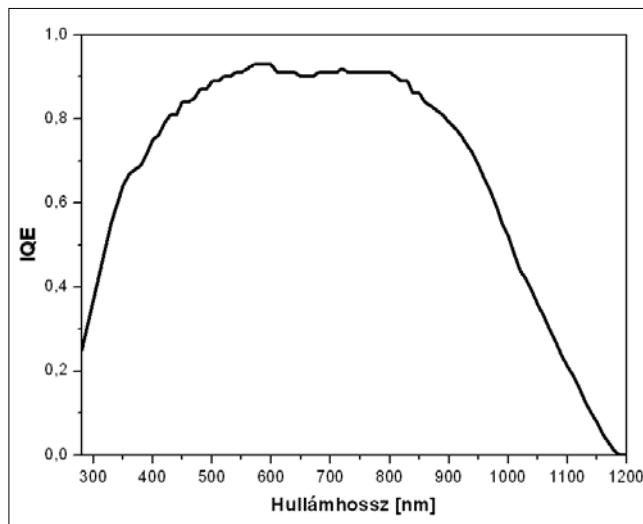
Jól ismert az a tény, hogy a kültérre tervezett kristályos Si napelemek hatásfoka a csökkenő fényintenzitással csökkenő tendenciát mutat [3-6]. Ennek ellenére megmutatjuk, hogy egy megfelelően megtervezett bel-

téri napelem hatásfoka a beltéri megvilágítás mellett nagyobb lehet, mint a kültéri napfényre.

A jelenlegi munka célja olyan, megfelelően sekély emitterű kristályos Si napelem cella kifejlesztése, amely a beltéri mesterséges fényre és a zárt ablakon beszűrődő napfényvel megvilágított szobában előforduló kevert megvilágításra nagy fényátalakítási hatásfokkal rendelkezik. Az emittereket Plazma Immerziós Ionimplantáció (PIII) technológiájával hoztuk létre, melyet először az MFA-ban alkalmaztunk napelem létrehozására [7].

Ezzel a technológiával 50-100 nm mélységű emittereket is könnyen elő lehet állítani [8]. Az alkalmazott vákuumkamra alkalmas akár 300 mm átmérőjű szeletek kezelésére is. A PIII adalékolási folyamat ideje rövid (jellemzően néhány másodperc), kis energia igényű, költségkímélő, a környezetet kevésbé terhelő technológia, így akár tömegtermelésre is alkalmas [9]. Megfelelő PIII és hőkezelés hatására a cellában nagyon sekély emitter keletkezik alacsony kristályhiba sűrűséggel [10-11]. A napelem létrehozásában további nehézséget jelentett az ultra sekély emitter réteghez illeszkedő jó, ohmikus kontaktus készítése.

1. ábra
PIII napelem jellegzetes belső kvantumhatásfoka



Az előzetes kísérletek megmutatták, hogy az így létrehozott kristályos Si napelem struktúrák a hagyományos módon létrehozottakhoz képest nagyobb belső kvantumhatásfokkal (IQE) rendelkeznek a fluoreszcens lámpafény spektrális tartományában (1. ábra).

2. Kísérletek

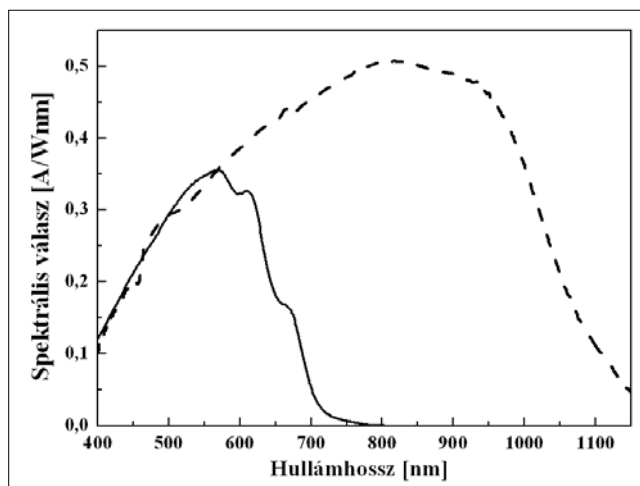
A PIII beltéri napelemeket 75 mm-es p-típusú <100> orientáltságú, 10-15 Ωcm ellenállású kristályos Czochralsky-szilícium szeleteken alakítottuk ki. Egy cella 4,592 cm^2 területű, a legjobb teljesítményt 9 fémcsíkos fémmezési ábrával sikerült létrehozni [2]. A p-n átmenetet foszfor adalékolással készítettük PIII technológiával 15%-os $\text{H}_2\text{:PH}_3$ gázelegyenben 1 mbar nyomáson. Ezután a szeleteket 600°C-on 10 percig formáló gázban, majd 930°C-on 5 percig O_2 atmoszférában hőkezeltük. A hőkezelés alatt nőtt foszforszilikát üveget (PSG) lemartuk. Az emitter-oldalon az antireflexiós SiO_2 réteget CVD technológiával választottuk le. Ennek vastagságát úgy optimalizáltuk, hogy 550 nm hullámhosszú fényen legyen a transzmissziós maximuma.

Az 1 μm vastag Al kontaktusokat vákuumgőzöléssel hoztuk létre. A hátoldali kontaktust leválasztása után 450°C-on 30 percig formáló gázban szintereltük. Az első oldali kontaktus ábrát lift-off technikával, hőkezelés nélkül alakítottuk ki. Mivel a beltéri fény intenzitása a kültérihez képest sokkal kisebb, a napelemből kinyert áram is jelentősen kisebb. Így a soros ellenállásnak kisebb befolyása van a hatásfokra, míg a kis áramok miatt a párhuzamos vezetés hatása jelentős [12]. Ezért az azonos négyzetes ellenállású emitterrel rendelkező kültéri napelemekéhez képest kevesebb fémcsíkot alkalmaztunk. Több különböző fémmezési ábrát próbáltunk ki, melyek 9, 11, 13 és 17 db 200 μm széles fémcsíkkal rendelkeztek. Ezek közül a beltéri fény hatására a 9 csíkkal rendelkező napelem teljesített a legjobban, míg AM1.5 megvilágítás (átlagos kültéri napfény 1 kW/m^2 -re normált sugárzási spektruma) esetén a 11 fémcsíkkal rendelkező napelem mutatta a legnagyobb hatásfokot [2].

Megmértük és kiértékeljük a cellák sötét dióda karakterisztikáját, napelem karakterisztikáját AM1.5 kültéri és fluoreszcens beltéri megvilágítás (Toshiba Watt Brighter FCL20W/18 fénycső) esetén és meghatároztuk a spektrális válaszokat is.

3. Mérési és modellezési eredmények

A PIII beltéri napelem cella mért spektrális válasza egy amorf Si beltéri napelemmel összehasonlítva a 2. ábrán látható. A referencia a kereskedelembe kapható amorf napelemek közül az általunk ismert legjobb hatásfokú. A különbség a két ábra között szembevetendő: 570 nm hullámhosszig a két válaszfüggvény együtt emelkedik, majd az amorf cella válaszfüggvénye gyorsan lecsökken, míg a PIII cella válaszfüggvénye 800 nm-ig nő és csak ez után romlik le. Ebből következik, hogy a nap-



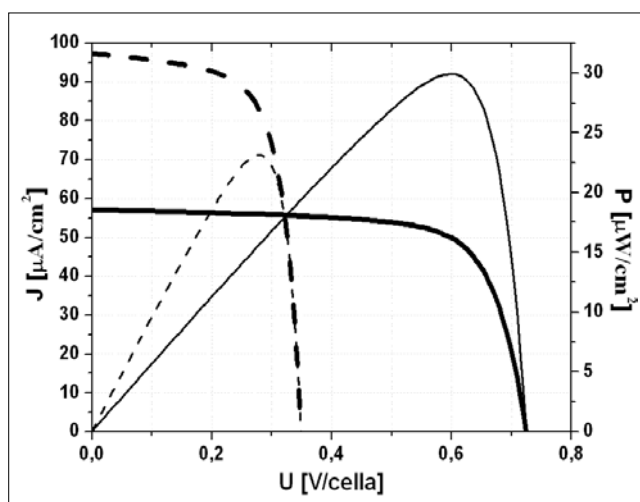
2. ábra
Beltéri napelemek spektrális válasz ábrája:
PIII cella (szaggatott) és referencia a-Si cella (folytonos).
A spektrális válasz: egy optikai érzékelő reakciója, mértéke az érzékelő válaszában (generált áram) és az egységnyi hullámhossz-tartományban besugárzott teljesítménynek a hányadosa.

elemet érő fény spektrumától függően a PIII cella az a-Si cellával összehasonlítva vagy közel azonos, vagy nagyobb áramot generál.

Beltéri mesterséges fényvel megvilágítva (700 lx) a napelem karakterisztikák összehasonlítása a 3. ábrán látható. Ahogy várható volt, a PIII cella rövidzárási árama nagyobb, mint az a-Si referencia cella esetén. Az üresjárási feszültsége azonban kisebb, hiszen a tiltott sávja is kisebb, ezért végül is a PIII beltéri napelem cella maximális teljesítménye is kisebb mint az amorf Si-é. Ilyen megvilágítás esetén tehát az amorf Si cella optimális terhelés esetén nagyobb hatásfokot tud elérni.

A spektrális válaszgörbék alapján azt várhatjuk, hogy szélesebb spektrumú fényre a PIII cella árama az amorf Si cellához képest annyira megnő, hogy ez a teljesítményét is megnövelheti. Ezért a beltéri cellákat szab-

3. ábra
Beltéri napelemek megvilágított állapotban mért karakterisztikái (vastag vonal) és teljesítmény görbéi (vékony vonal) fluoreszcens lámpafénnyel megvilágítva (700 lx): JB55 PIII cella (szaggatott) és a-Si cella (folytonos).



Minta neve	Fény	η [%]	FF	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} /cella [V]	J_{op} [mA/cm ²]	V_{op} /cella [V]	P_{max} [mW/cm ²]
JB55 ele9	AM1.5	7,05	0,66	21,16	0,508	19,27	0,366	7,053
JB55 ele11	AM1.5	8,55	0,71	24,62	0,489	22,79	0,375	8,551
a-Si	AM1.5	1,32	0,33	4,56	0,885	2,52	0,522	1,318
JB55 ele9	Beltéri 700 lx	12,05	0,68	9,74E-02	0,349	8,33E-02	0,278	2,31E-02
JB55 ele11	Beltéri 700 lx	11,12	0,67	8,73E-02	0,367	7,31E-02	0,292	2,14E-02
a-Si	Beltéri 700 lx	15,58	0,72	5,71E-02	0,725	4,98E-02	0,601	2,99E-02

1. táblázat A beltéri napelemek paramétereit különböző megvilágítási esetekre:

η a cella hatásfoka, FF a kitöltési tényező, J_{sc} a rövidzárási áramsűrűség, V_{oc} az üresjárás feszültség, P_{max} a maximális kivehető teljesítmény, J_{op} és V_{op} pedig a P_{max} -hoz tartozó áram és feszültség értékek.

ványos AM1.5 kültéri megvilágításra is megvizsgáltuk. Az így kapott napelem karakterisztikák és teljesítmény görbék a 4. ábrán láthatóak. Az amorf Si cella nagy soros ellenállásának következtében árama tovább csökkent és jelleggörbéje is ellaposodott, ami további teljesítmény csökkenéshez járult hozzá. Ezért a PIII cella teljesítménye és hatásfoka napfény esetére jóval nagyobb lett a referencia a-Si cellához képest.

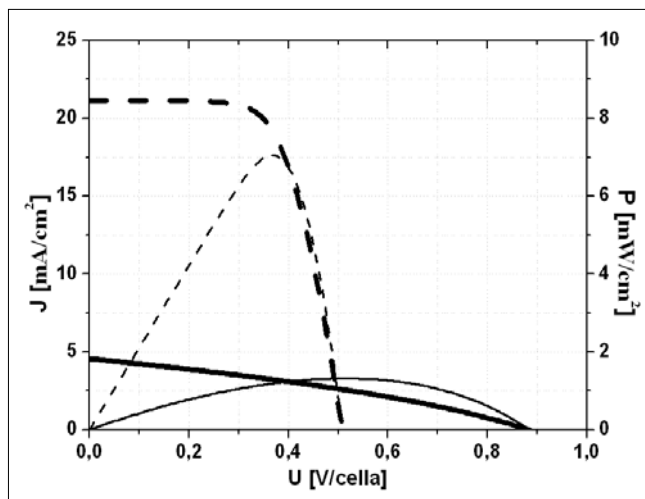
A beltéri napelemek karakterisztikáiból meghatározott paramétereket a JB55-ös cellákra (9 és 11 vonalas fémábrával), illetve a referencia amorf Si cellára fluoreszcens (700 lx) és kültéri (AM1.5) megvilágítás esetében az 1. táblázat foglalja össze. Látható, hogy a beltérre tervezett cellák hatásfoka fluoreszcens megvilágítás esetében nagyobb (11,12-15,58%), mint a kültéri megvilágítás hatására (1,32-8,55%). Leginkább az a-Si cella hatásfoka csökkent le (15,58%-ról 1,32%-ra) a rá jellemző spektrális válaszfüggvény és a nagy soros ellenállás következtében. A JB55 minták esetén a fluoreszcens fényre a 9 vonalas fémábrájú cella bizonyult jobbnak (12,05%), míg kültéri fényre a 11 vonalas fémábrájú teljesített jobban (8,55%).

4. ábra

Beltéri napelemek karakterisztikái (vastag) és teljesítmény görbéi (vékony)

AM1.5 megvilágítással (100 mW/cm²):

JB55 PIII cella (szaggatott) és a-Si cella (folytonos).



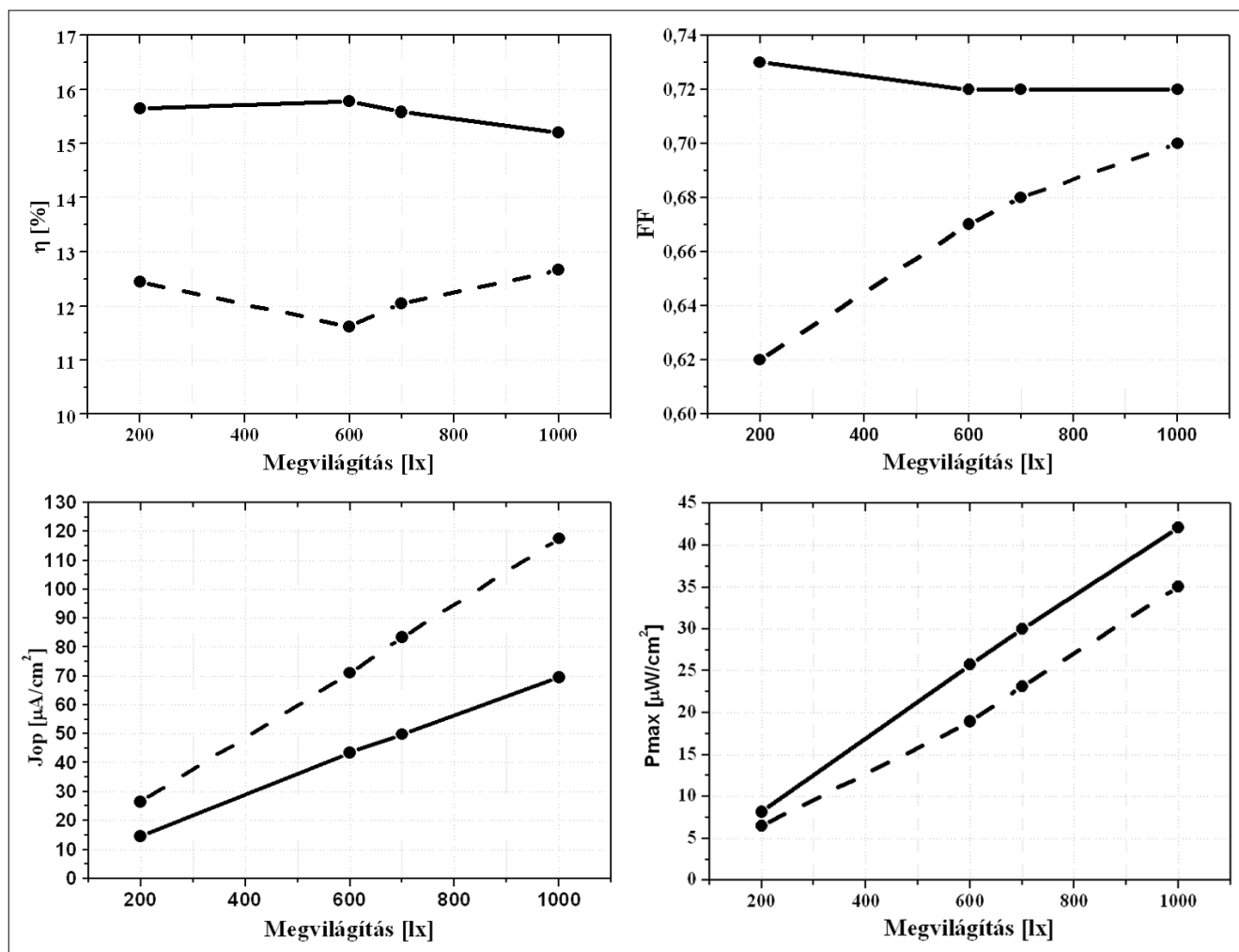
A napelem cellákat különböző erősségű fluoreszcens beltéri megvilágításnál is megvizsgáltuk, az így kapott paraméterek összehasonlítását a következő oldali, 5. ábrán láthatjuk (hatásfok, kitöltési tényező, maximális teljesítmény és a hozzá tartozó áramsűrűség). Növekvő megvilágítás esetén a felvett áram és teljesítmény lineárisan nő, a kitöltési tényező (FF) a PIII cella esetében nő, míg az a-Si cella esetén enyhén csökken. A hatásfok a PIII cella esetén növekvő megvilágításra 600 lx-ig csökken, majd felette növekszik. A referencia a-Si cella esetében 600 lx-ig enyhén nő, azon túl fokozatosan csökken. Az 1000lx-os megvilágításig a hatásfok mindig a PIII cellánál nagyobb. A tendencia arra utal, hogy nagyon erős fluoreszcens beltéri megvilágítás esetén a PIII cella hatásfoka nagyobbá válhat a referencia a-Si celláénál. Mindenesetre átlagos erősségű fluoreszcens beltéri megvilágításnál a referencia amorf Si cella fényátalakítása hatékonyabb.

A spektrális válasz és az AM1.5 napfényre kapott napelem karakterisztikák arra ösztönöztek, hogy megvizsgáljuk a viselkedéseket arra a praktikus esetre is, amikor a fény többféle forrásból, a Napból és a fluoreszcens beltéri világításból egyaránt érkezik. Ilyen uralkodik egy olyan helyiségben, ahol a fénycsóvilágítás mellett van ablakon beszűrődő gyenge intenzitású napsugárzás is.

Négyféle kevert megvilágítást vizsgáltunk meg két különböző erősségű napfény (szobában mért szórt napfény, illetve AM1.5 fény 1% intenzitással) és kétféle beltéri fluoreszcens fény (150 lx szobavilágítás és 700 lx asztali lámpa) felhasználásával.

Az elnevezések a következők:

- Sp1: szobában mért szórt napfény + 150 lx fluoreszcens szobavilágítás (376,25 μ W/cm²)
- Sp2: szobában mért szórt napfény + 700 lx fluoreszcens asztali lámpafény (495,06 μ W/cm²)
- Sp3: 1% intenzitású AM1.5 napfény + 150 lx fluoreszcens szobavilágítás (1066,6 μ W/cm²)
- Sp4: 1% intenzitású AM1.5 napfény + 700 lx fluoreszcens asztali lámpafény (1185,4 μ W/cm²)



5. ábra Beltéri napelemek paraméterei különböző erősségű fluoreszcens beltéri megvilágítás esetében: hatásfok (η), kitöltési tényező (FF), maximális teljesítmény ($P_{\max}$) és a hozzá tartozó áramsűrűség (J_{op}) JB55 PIII cellára (szaggatott) és a-Si referencia cellára (folytonos).

Ezúttal három napelem cellát hasonlítottunk össze:

- a JB55 PIII cella 9 vonalas fémmábrájú változatát,
- a referencia a-Si cellát és
- egy kristályos Si kültéri napelem cellát (c-Si), mint referenciát.

Mindhárom cella mért I-V karakterisztikájához görbét illesztettünk, majd a mért spektrális válaszok segítségével a különböző kevert megvilágításokra adott választ kiszámítottuk és értékeltük. Az eredményeket a 2. táblázatban láthatjuk.

2. táblázat A cella modellek alapján számított napelem paraméterek különböző kevert megvilágítás esetén

Minta	Fény	η [%]	ff	J_{sc} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	$V_{\text{oc}}/\text{cell}$ [mV]	J_{op} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	$V_{\text{op}}/\text{cell}$ [mV]	$P_{\max}$ [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
JB55ele9	Sp1	8	0,69	122	356	105	283	30
a-Si	Sp1	14,6	0,75	98	748	88	619	55
c-Si	Sp1	7,2	0,63	108	397	90	298	27
JB55ele9	Sp2	8,3	0,69	162	366	141	292	41
a-Si	Sp2	15,6	0,75	135	761	122	632	77
c-Si	Sp2	7,5	0,64	142	410	120	311	37
JB55ele9	Sp3	8	0,71	309	386	274	311	85
a-Si	Sp3	6,8	0,75	128	759	116	629	73
c-Si	Sp3	7,4	0,67	270	440	232	341	79
JB55ele9	Sp4	8,3	0,72	349	390	311	314	98
a-Si	Sp4	8	0,75	165	769	150	635	95
c-Si	Sp4	7,7	0,67	304	445	263	346	91

Az első két kevert fényre magasan az amorf Si referencia cella bizonyult a legjobbnak (14,6-15,6%), míg a második két kevert fényre a PIII cella mutatta a legjobb hatásfokot (8-8,3%). A kültéri referencia cella (c-Si) mind a négy kevert megvilágítási esetben kisebb hatásfokú volt a PIII cellához képest.

4. Következtetések

A mérési és modellezési eredmények arra utalnak, hogy a valós körülmények között gyakori kevert fényű megvilágítás esetén az általunk kifejlesztett kristályos Si beltéri napelem cella ígéretes.

További javulás érhető el a fémezés javításával (soros ellenállás csökkentése), illetve a felületi rekombináció csökkentésével (jobb passziválással). A soros ellenállás csökkentésére az általunk alkalmazott sekély emitter esetén jó megoldás a szelektív emitter, azaz a fémezés alatt közvetlenül mélyebb és erősebben adalékolt n-típusú réteg alkalmazása [13].

A legújabb kísérletek azt mutatják, hogy beltéri napelem cellán szitanyomtatott kontaktus is alkalmazható közvetlenül a sekély emitter rétegen, megfelelően nagy párhuzamos ellenállással, jó hatásfokú beltéri napelem karakterisztikával. Intézetünkben jelenleg ezek további kutatása folyik.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás elindításáért és a fejlesztésben való hathatós támogatásért köszönet illeti a Tateyama Kagaku Ltd.-et, amely nélkül ez a munka nem jöhetett volna létre. A kutatást a 3/025/2001 sz. NKFP projekt is támogatta.

Irodalom

- [1] R.O. Bell,
"Charge collection and spectral response of amorphous-silicon solar cells",
Applied Physics Letters, Vol. 36., 1 June 1980, pp.936–938.
- [2] E. Kuthi, Á. Németh, I. Pintér, Y. Makita, B. Szentpáli, I. Bársony,
"PIII solar cell with self-doping contacts for indoor application",
Proc. of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2006), pp.1057–1059.
- [3] N.H. Reich, W.G.J.H.M. van Sark, E.A. Alsema, S.Y. Kan, S. Silvester, A.S.H. van der Heide, R.W. Lof, R.E.I. Schropp,
Weak Light performance and spectral response of different solar cell types,
Proc. of the 20th EU PVSEC 2005, (Eds.: W. Palz, H. Ossenbrink, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2005. pp.2120–2123.
- [4] J. F. Randall, J. Jacot,
"Is AM1.5 applicable in practice?
Modelling eight photovoltaic materials with respect to light intensity and two spectra",
Renewable Energy, Vol. 28., No.12., October 2003. pp.1851–1864.
- [5] S. Keller, S. Scheibenstock, P. Fath, G. Willeke, E. Bucher,
"Theoretical and experimental behavior of monolithically integrated crystalline silicon solar cells",
J. of Applied Phys., Vol. 87., No.3., 1 Februar 2000. pp.1556–1563.
- [6] S.Y. Kan,
"Energy Matching – Key towards the design of sustainable photovoltaic powered products",
PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006.
- [7] I. Pintér, M. Ádám, Cs. Dücső, N.Q. Khanh, I. Bársony,
"Plasma immersion doping for Si solar cell application",
Supplément à la Revue: Le Vide No.275, Janvier-Février-Mars (1995), p.410.
- [8] I. Pintér, A.H. Abdulhadi, Zs. Makaró, N.Q. Khanh, M. Ádám, I. Bársony, J. Poortmans, Hai-Zhi Song, G.J. Adriaenssens,
"Plasma Immersion Ion Implantation for shallow junctions in Silicon",
Applied Surf. Science 138-139. (1999), pp.224–227.
- [9] I. Pintér, A.H. Abdulhadi, Cs. Dücső, I. Bársony, J. Poortmans, S. Sivoththaman, H.F.W. Dekkers, G.J. Adriaenssens,
"Silicon Solar Cells prepared by PIII-RTP technique"
Proc. of the Int. Conference held in Glasgow, UK, 1-5 May 2000, Vol.II, pp.1743–1646.
- [10] Shaaban E.R., Lohner T., Pintér I., Petrik P., Khanh N.Q., Horváth Z.E., Gyulai J.,
"Characterization of near surface region of plasma immersion ion-implanted silicon using Rutherford backscattering spectrometry, transmission electron microscopy and spectroscopic ellipsometry",
VACUUM 71. (1-2), 9 May 2003, pp.27–31.
- [11] Á. Németh, I. Pintér, Z. Lábadi, A. Tóth, S. Püspöki, I. Bársony,
Proc. of the 21st EU PVSEC (2006), 2DV.2.32.
- [12] Green M.,
Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications, University of New South Wales (1982), pp.96–97.
- [13] Kuthi E.B.,
"Szelektív emitteres kristályos napelemek és az önadalékoló kontaktus",
Híradástechnika, Vol. LIX., 2004/1., pp.31–42.

Napelemtechnológiai Innovációs Centrum az MTA MFA-ban

NÉMETH ÁGOSTON, LÁBADI ZOLTÁN, RAKOVICS VILMOS, BÁRSONY ISTVÁN
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
nemeth@mfa.kfki.hu

KRAFCSIK ISTVÁN
EnergSolar Rt.

Lektorált

Kulcsszavak: napelemek, Cu(InGa)Se_2 , vákuumtechnológiák

Cikkünk a magyarországi napelemmel kapcsolatos kutatás-fejlesztés egyik legnagyobb vállalkozását, az MTA MFA-ban megépült Napelemtechnológiai Innovációs Centrumot mutatja be. A NKFP projekt keretében megvalósult és az EnergSolar Rt. által megépített integrált vákuumrendszer egy, a vékonyréteg napelemek családjában tartozó napelemtípus a réz-indium-gallium-diszelenid (CIGS) rétegszerkezetének leválasztására alkalmas. Cikkünk bemutatja ennek a napelemtípusnak és a kutatási célú berendezésnek a felépítését, az alkalmazott technológiákat és az anyagrendszerben felmerülő főbb anyagtudományi problémákat, valamint a kutatás előtt álló kihívásokat.

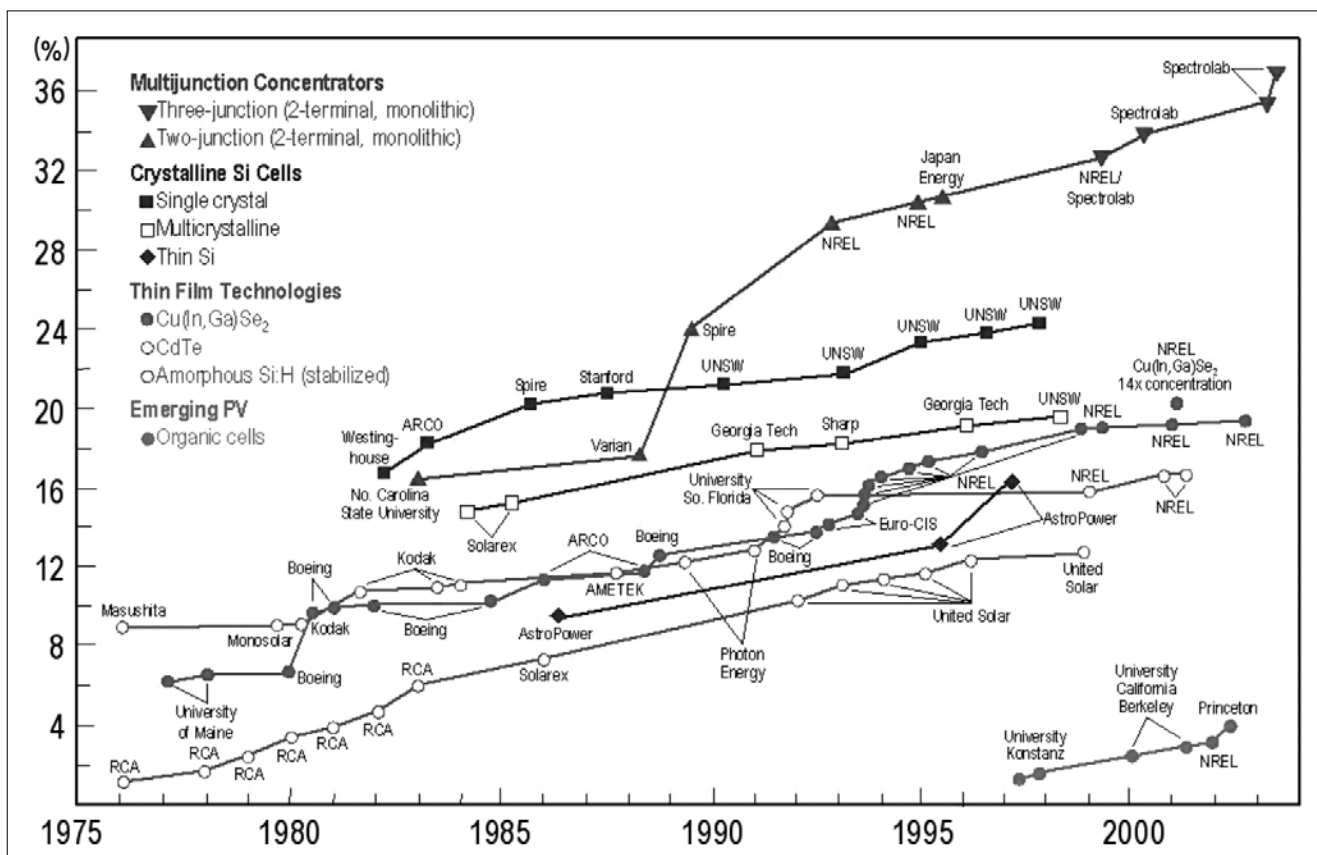
1. Bevezetés

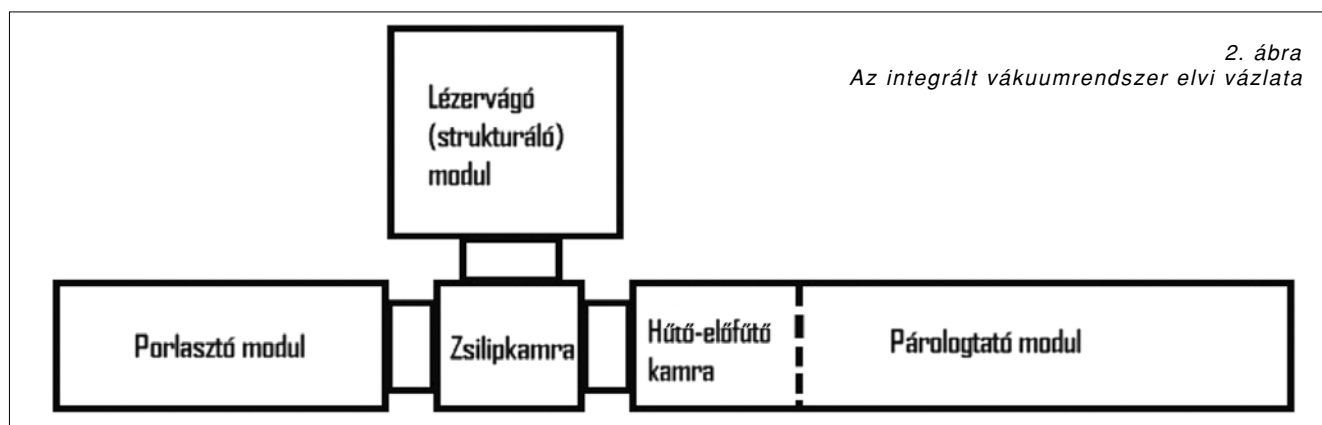
Napjainkban a környezetkímélő energiaforrások piacán, ezen belül a napelemek terén hatalmas fellendülés zajlik. Ezt részben politikai tényezők (a globális felmelegedés miatt növekvő aggodalom, a riói és kyotói egyezmények) motiválják, részben pedig a rohamos műszaki fejlődés hajtja. Az elmúlt évtized folyamán a fotovoltai-kus cellák és modulok gyártási üteme évi 35%-kal növekedett, és 2004-ben már meghaladta az 1 GW éves

teljesítményt. Ennek legnagyobb része kristályos szilícium (c-Si) alapú technológiákkal készült termék volt.

A kristályos illetve polikristályos szilícium alapanyag-ellátás azonban egyre inkább meghatározó szűk keresztmetszetévé válik ennek az iparágaknak. Habár a szilícium a földkéreg egyik leggyakoribb eleme, a félvezető minőségű kristályos szilícium előállítása költséges és energiaigényes folyamat. Mértékadó becslések szerint emiatt a következő évtizedben a c-Si alapú napelemgyártás kb. 3-4 GW/év termelési értéknél telítődni fog [1-3].

1. ábra Különböző típusú napelemek hatásfoka naptári évek szerint (forrás: NREL, USA)





2. ábra
Az integrált vákuumrendszer elvi vázlata

Ez a körülmény fokozottan előtérbe helyezi a *nem szilícium alapú* vékonyréteg napelemek fejlesztését. Az alternatívák között a legfontosabb a réz-indium-diszelenid (CIS) alapú vékonyréteg napelem. A réz-indium-gallium-diszelenid potenciális alapanyagként már a 80-as években felmerült, napjainkban azonban kutatása és fejlesztése világszerte nagy lendületet kapott. A CuInGaSe_2 (CIGS) számos előnyös tulajdonsággal bír fotovoltaiikus alkalmazás szempontjából:

- stabil kalkopirit szerkezetű anyag,
- Cu-szegény növesztési körülmények között könnyen kialakítható benne a p-típusú vezetőképesség, és
- igen jó hatásfokú cellák készíthetők belőle (a laboratóriumi rekord jelenleg 19% , ipari méretekben pedig 11%).

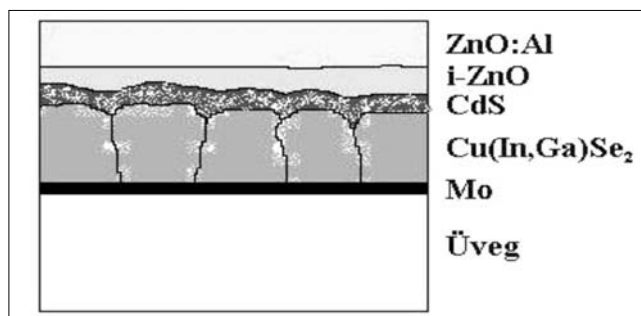
A c-Si alapú modulok jellemzően 12,7-13,5% hatásfokához viszonyítva ez ígéretes érték és a laboratóriumi eredmények alapján még további jelentős javulás várható. Az 1. ábra az amerikai Nemzeti Megújuló Energiaforrás Laboratórium (NREL) adatai alapján foglalja össze a különböző típusú napelemek kutatása során elért hatásfokjavulás időbeli trendjét.

A műszaki-tudományos lehetőségek szempontjából sokat ígérő kutatás-fejlesztési témakör legnagyobb magyarországi K+F projektje 2001-ben kezdődött el. A projekt célja egy olyan integrált vákuumtechnikai rétegleválasztó berendezés megépítése volt, amely alkalmas CIGS napelem rétegszerkezet kialakítására, a komplex technológia fejlesztésére és a szakemberek képzésére, betanítására.

A projektet Nemzeti Kutatás-Fejlesztési Program keretében a Széchenyi-terv majd az NKTH finanszírozta. A konzorciumi keretek között indított projektben kezdeményező szerepe volt a magyarországi vákuumtechnikai ipar egyik fontos vállalatának, a Kraft Rt-nek, akik gazdasági okokból kénytelenek voltak a konzorcium vezetését 3 éve átadni az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetnek. A konzorcium másik ipari vállalkozása a Villamos Hajtások és Járműelektronikai Kft., további kutató tagjai az MTA ATOMKI Debrecen, a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéke és a BME Elektronikus Eszközök Tanszéke voltak.

2. Integrált vákuumrendszer felépítése

A 2007 nyarán zárult NKFP projekt keretében az MTA MFA-ban egy olyan integrált vákuumtechnikai rétegleválasztó berendezés épült meg, amely alkalmas $30 \times 30 \text{ cm}^2$ -es üveg szubsztrát felületén CIGS napelem rétegszerkezet kialakítására. A rendszert az EnergoSolar Rt. tervezte és építette fel. A berendezés elvi elrendezési vázlatát a 2. ábrán, a leválasztani kívánt rétegszerkezet elvi keresztmetszeti rajzát pedig a 3. ábrán láthatjuk.

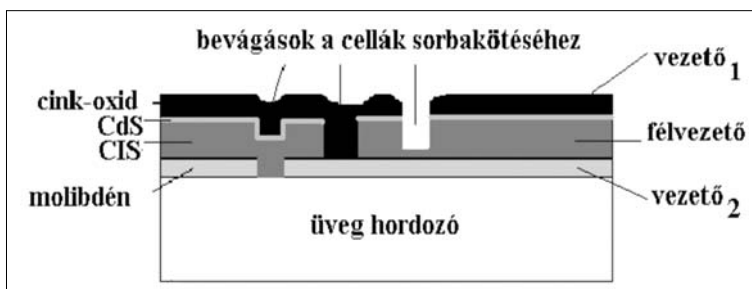


3. ábra
A CuInGaSe_2 napelemstruktúra keresztmetszete

A napelem-szerkezet létrehozásához a CIGS félvezető réteget két kontaktusréteg között (esetünkben Mo hátlapkontaktus és ZnO ablak-rétegek közé ágyazva) kell az üveg hordozó felületén leválasztani. Ehhez négy fő technológiai modulból álló integrált rendszer épült meg az alábbiak szerint:

– A kontaktusrétegek leválasztása porlasztással, míg a CIGS réteg leválasztása párologtatással történik. Ennek megfelelően a két fő rétegleválasztó egység a rendszerben a porlasztó-, illetve a párologtató kamra.

4. ábra
Lézeres vágatok a rétegekben a cellák sorba kötéséhez



– Az üveg-szubsztrát felületére leválasztott rétegekből laterálisan szegmentált, sorbakötött cellákat kell kialakítani a megfelelő kapocsfeszültségű napelemmodul létrehozása céljából, ezért valamennyi leválasztott rétegben vágatokat kell kialakítani a 4. ábrának megfelelően. A rétegszeparációhoz a vágások lézernyaláb segítségével történnek, ennek megvalósítására szolgál a 2. ábrán látható lézervágó kamra.

– A negyedik technológiai egység a kamrarendszer középpontjában elhelyezkedő zsilipkamra. Ez a modul x-y irányú transzport-mechanika segítségével biztosítja a minta (az üveg-hordozó) továbbítást a kamrák között.

A nagyméretű nagyvákuum-kamrák mindegyike 10^{-6} mbar végnyomásra szívható le olajdiffúziós szivattyúk segítségével. Az egyes kamrákat pneumatikus tolózárak szakaszolják. A szelepek, tolózárak valamint a transzport mechanika vezérlését egy dedikált, a rendszer számára kifejlesztett számítógépes szoftver végzi.

A porlasztó kamrában az átlátszó vezető kontaktusréteg (a ZnO ablakréteg) leválasztására az úgynevezett reaktív porlasztásos technológiát alkalmazzuk. A porlasztott target fém alumínium-cink ötvözet, a leválasztás pedig argon-oxigén plazma segítségével történik. Az alumínium n-típusú adalékként épül be a ZnO-ba, ami a kontaktus-réteg vezetőképességét biztosítja.

A rendszer egyik legösszetettebb és legkritikusabb része a párologató modulba épített grafit elosztócsöves vonalforrások képezik. Ezek a források egyenként négy, megfelelően méretezett geometria szerint elhelyezett pontforrásból párologtatják az anyagot. A leválasztás

úgynevezett együttpárologtatás módszerrel történik. Az egyes vonalforrások a négy elemi összetevő valamelyikét (Cu, In, Ga, Se) párologtatják, majd a végleges kristályszerkezet illetve morfológia kialakítása – megfelelően megválasztott hőkezelési programmal – a hűtő-előfűtő kamrában történik (lásd 2. ábra).

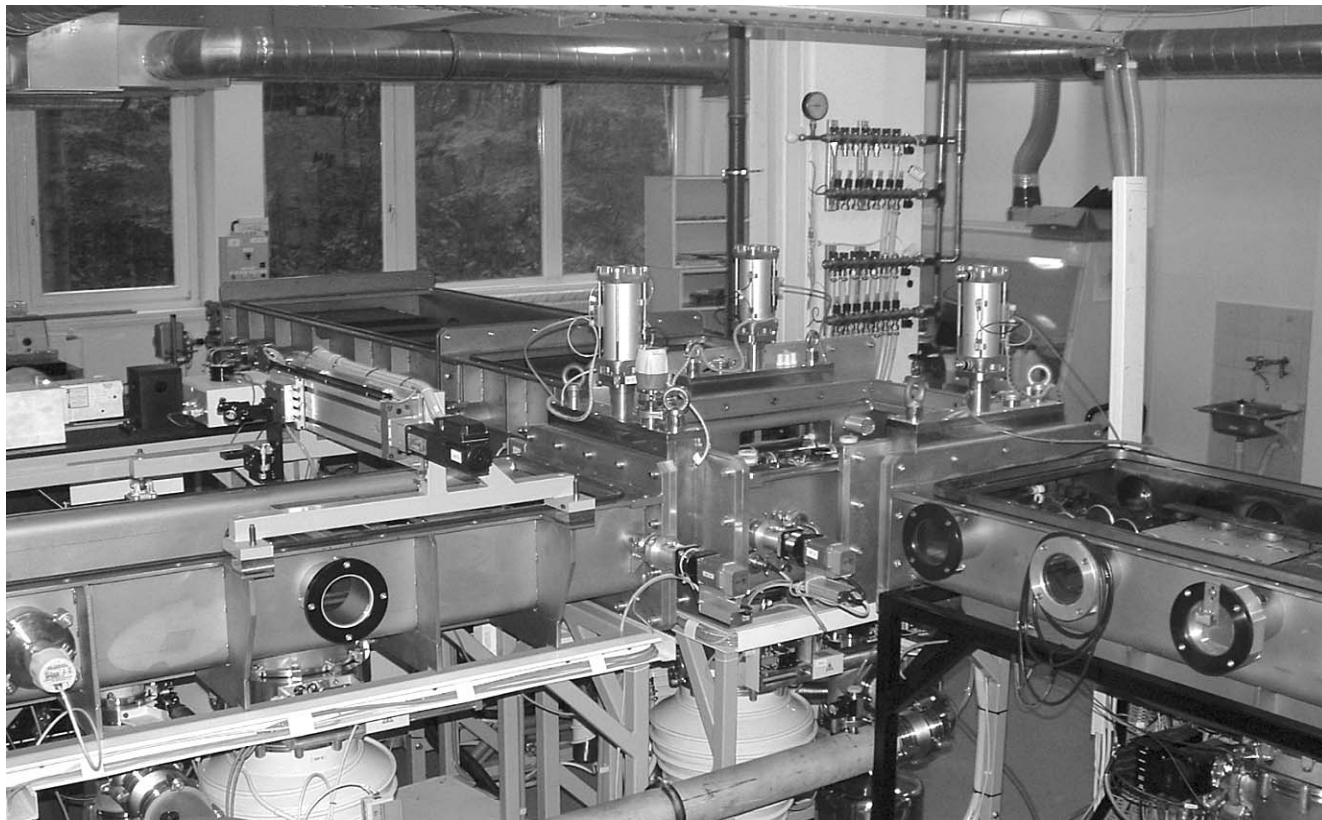
Az 5. ábra a vákuumkamra-rendszer fényképét mutatja be.

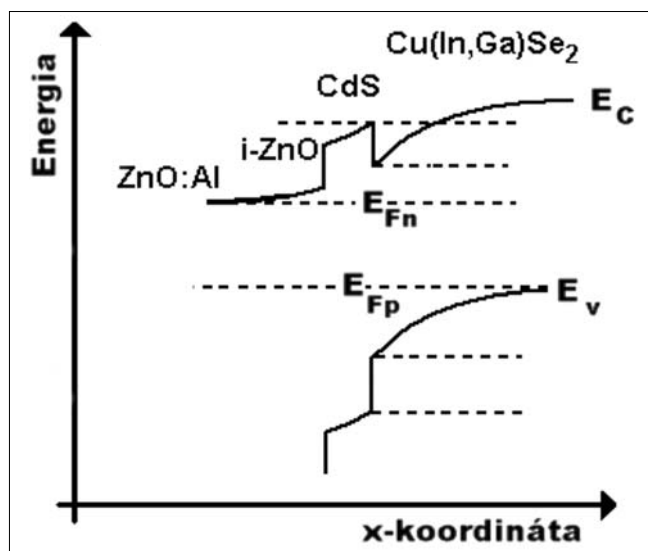
3. Anyagtudományi problémák a CuInGaSe_2 anyagrendszerben

A direkt tilos sávú kalkopirit félvezetőknek a látható spektrumban tapasztalt erős elnyelése lehetővé teszi vékonyréteg abszorbereken alapuló napelem cellák készítését. Ez azonban azt is jelenti, hogy a beeső napfény a felülethez közel nyelődik el. Még ha sikerülne is tehát az adalékolásra jól ellenőrzött, reprodukálható módszert találni, a p-n átmenet és a felület között keletkező töltéshordozók jelentős része elveszne a felületi rekombináció miatt.

Ezt a problémát az ablakréteg (az átlátszó vezető ZnO réteg) és az abszorber félvezető réteg közötti *heteroátmenet koncepciójával* lehet feloldani. A széles tilos sávú ablakréteg miatt az abszorpció a felületről így ugyanis a belső heteroátmenetre tolódik el. A rekombináció csökkentésének leghatékonyabb módja az, ha az elektronok és lyukak sűrűségét az átmenetnél minimumra csökkentjük, amihez megfelelő sávél-illesztés szükséges. Ez adalékolással valósítható meg.

5. ábra Az integrált vákuumrendszer előtérben a lézervágó kamrával





6. ábra

A CIGS napelemszerkezet sávszerkezeti képe [4]

A szerkezetnek tehát egy n^+ -ablakréteg / p -abszorber heteroátmenetet kell tartalmaznia a 6. ábra szerint. A sávszerkezetben a Fermi-nívónak az átmenetnél a vezetési sáv éléhez közel kell lennie. Ahol a Fermi-nívó a tilos sáv közepét metszi, annak a helynek az abszorberben kell lennie az átmenethez közel. A felületi töltésnek pedig ahhoz, hogy segítse a megfelelő sávkép kialakulását, pozitívnak kell lennie.

Az optimális tulajdonságú CIGS réteg leválasztása a továbbiakban a következő öt fő anyagtudományi probléma vizsgálatát teszi szükségessé:

- A Cu hiányos növesztés feltételei mellett az anyagban kialakuló sekély akceptor-nívók tanulmányozása, amelyek a réteg p típusú adalékolását teszik lehetővé
- Az In/Ga arány segítségével optimalizálható sávszélesség, illetve a réteg keresztmetszetében változó sávszélesség kialakítása
- A szemcseméret eloszlás hatásának vizsgálata a réteg tulajdonságaira
- Nátrium hordozóüvegéből történő diffúziójának hatása
- Vákuumtechnológiával kompatibilis, úgynevezett pufferréteg leválasztása a CIGS réteg és a transzparens kontaktusréteg közé (6. ábra)

A Napelemtechnológiai Innovációs Centrumban folytatott eddigi kísérletek eredményei a következőkben foglalhatók össze [5-14]:

– A porlasztó modulban végzett kísérletekkel optimalizáltuk a Mo kontaktusréteg és a ZnO:Al ablakréteg optimális leválasztási technológiáját és megvizsgáltuk a reprodukálhatóság feltételeit. A reaktív porlasztással előállított réteg ellenállása $1,7 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$, ami megfelel az irodalomban közölt legjobb adatoknak.

– A technológiai tapasztalatokat értékelve megállapítható, hogy az ablakrétegnek optimális ZnO összetételűtől való eltérés a fém-, illetve a kerámia-szerkezet irányába egyaránt nyomon követhető a spektroszkópiai ellipszometria módszerével. Ez a módszer tehát egy ha-

tékony in-line méréstechnika integrálását teszi lehetővé a rendszerbe.

– A lézervágó modulban folytatott kísérletekkel a Szegei Tudományegyetem kutatóival kidolgoztuk a szelektív vágás technológiáját mind a ZnO mind pedig a Mo kontaktusrétegre.

– Kidolgoztunk egy nedves-kémiai leválasztási technológiát a CIGS és a ZnO rétegek közötti CdS pufferréteg előállítására (6. ábra).

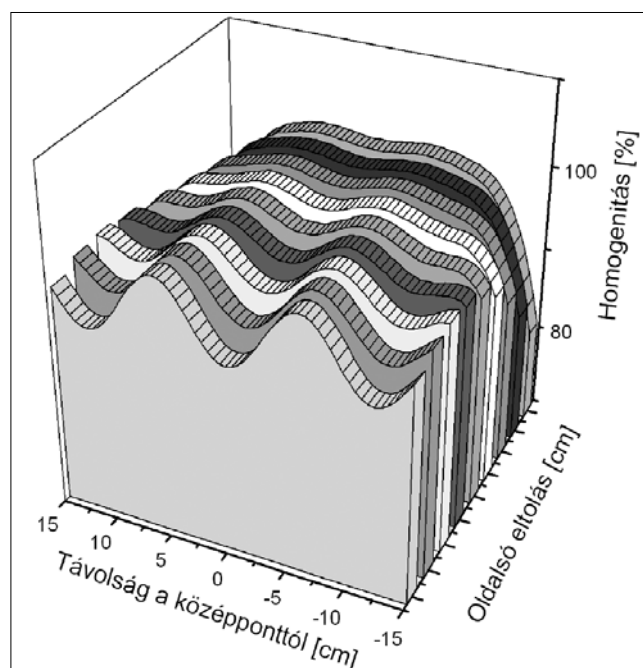
– A három iker-vonalforrásból (Cu-Se, In-Se, Ga-Se) egyidejű párologtatással előállított félvezető réteg vastagságeloszlásának modellezését egyedi forrásokból végzett kísérleti párologtatások alapján dolgoztuk ki. Ez a modell szolgált a párologtató kamra vonalforrásai méretezésének alapjául. A 7. ábrán egy jellemző eredményt mutatunk be.

A Napelemtechnológiai Innovációs Centrum számára alapvető fontosságú méréstechnikai háttér az MTA MFA valamint a konzorciumban részt vett akadémiai és egyetemi kutatóhelyek biztosítják. A komplex minősítési metodika a következő vizsgálatokat foglalja magában:

1. Morfológiai vizsgálat pásztázó elektronmikroszkóppal SEM-FESEM (MFA)
2. Elemösszetétel vizsgálat Elektron Diszperzív Spektrum (EDS) alapján (MFA)
3. Elemösszetétel és fázisvizsgálat Röntgendiffrakció alapján (MFA)
4. Fotolumineszcencia vizsgálat (MFA)
5. Ellipszometriás rétegvastagság és összetétel-vizsgálat (MFA)
6. Elektronspektroszkópia (XPS) és szekunder ion tömegspektroszkópia (SIMS) (ATOMKI)
7. Felületi potenciálmérés (Kelvin módszerrel), napelemek üresjárási feszültségének feltérképezése (BME)

7. ábra

Párologtatott CIGS rétegek vastagságeloszlásának függése a pontforrások egymáshoz viszonyított elhelyezésétől



5. Összefoglalás

Cikkünkben bemutattuk a Napelemtechnológiai Innovációs Centrumot, amely egy konzorciumi projekt keretében az MTA MFA-ban épült meg. Ez a Magyarországon egyedülálló kutatás-fejlesztési berendezésegység polikristályos CIGS napelemtechnológia fejlesztésére alkalmas zárt ciklusú, kísérleti vékonyréteg leválasztó rendszer lézeres laterális strukturáló modulal, amely in-line mérési opciókkal kiegészítve alkalmas

- technológia kutatási-fejlesztési célra;
- oktatásra, szakemberképzésre, betanításra;
- az ipari partner marketing tevékenységének támogatására.
- csaknem 12%-os hatásfokú (300x300 mm²) panelek kissorozatú gyártására.

A projekt eddigi eredményeit a <http://www.mfa.kfki.hu/Napelem-CIS/> honlap mutatja be.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatalnak a 3/025/2001 számú projekt finanszírozásáért, a cikkben felsorolt összes konzorciumi partnernek részvételükért, valamint az EnergoSolar Rt.-nek a berendezés tervezéséért és megépítéséért

Irodalom

- [1] Dhere, N.G., Toward GW/year of CIGS production within the next decade, Solar Energy Materials & Solar Cells 91. (2007), pp.1376–1382.
- [2] Thin Film Solar Cells, Fabrication, Characterization and Applications (ed. J. Poortmans and V. Arkhipov), Wiley Series in Mat. for Electr. & Optoelectr. Appl., John Wiley & Sons, 2006.
- [3] Dhere, N.G., Present status and future prospects of CIGS thin film solar cells, Solar Energy Materials & Solar Cells 90. (2006), pp.2181–2190.
- [4] Rau, U., Schock, H.W., Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells-recent achievements, current understanding and future challenges, Applied Physics A 69. (1999), pp.131–147.
- [5] E. Horváth, A. Németh, A.A. Koós, A. L. Tóth, L.P. Biró, J. Gyulai, Focused Ion Beam based sputtering yield measurements on ZnO and Mo thin films, Superlattices and Microstructures, In Press, available online 8 June 2007.
- [6] Á. Németh, Cs. Major, M. Fried, Z. Lábadi, I. Bársony, Characterisation of transparent conductive ZnO layers by spectroscopic ellipsometry, Submitted to Thin Solid Films.
- [7] A. Buzás, Zs. Geretovszky, Patterning ZnO layers with frequency doubled and quadrupled Nd:YAG laser for PV application, Thin Solid Films, In Press, Corrected proof available online 16 April 2007 (doi:10.1016/j.tsf.2007.04.026)
- [8] Á. Németh, E. Horváth, Z. Lábadi, L. Fedák, I. Bársony, Single step deposition of different morphology ZnO gas sensing films, Sensors and Actuators B, accepted for publication.
- [9] Rakovics V., Chemical bath deposition of CdS and CdPbS nanocrystalline thin films and investigation of their photoconductivity, 2005 MRS Fall Meeting, 27 November - 2 December, Boston, MRS Symposium Proceedings 900, pp.87–91.
- [10] V. Rakovics, Zs.J. Horváth, Z.E. Horváth, I. Bársony, C. Frigeri, T. Besagni, Investigation of CdS/InP heterojunction prepared by chemical bath deposition, 8th Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies, EXMATEC'06, 14-17 May 2006, Cádiz, Spain, Physica Status Solidi C 4. (2007), pp.1490–1494.
- [11] V. Rakovics, Zs.J. Horváth, K.T. Eppich, B. Pődör: Electrical and photoelectrical behaviour of nanocrystalline CdS/InP heterojunction p-n diodes, XXXV Int. School on the Physics of Semiconducting Compounds, 17-23 June 2006, Jaszowiec, Poland, Abstract Booklet, p.44.
- [12] Zs.J. Horváth, V. Rakovics, Z.E. Horváth, Electrical properties of nanocrystalline CdS/InP heterojunction p-n diodes prepared by chemical bath deposition, International Workshop on Nanostructured Materials, NANOMAT 2006, 21-23 June 2006, Antalya, Turkey, Book of Abstracts, p.69.
- [13] V. Rakovics, Zs.J. Horváth, B. Pődör, Electrical and optical behaviour of nanocrystalline CdS/InP heterojunction p-n diodes, 6th Int. Conference Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, ASDAM'06, 16-18 October 2006, Smolenice, Slovakia, Proc. p.155.
- [14] Á. Németh, V. Rakovics, E.B. Kuthi, Z. Lábadi, Á. Nemcsics, S. Püspöki, A.L. Tóth, I. Bársony, Study the properties of sulphide buffer layers as a function of deposition parameters and annealing, Proc. of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany pp.1986–1989.

Termisztorok és bolométerek zajhatárolt érzékenysége

SZENTPÁLI BÉLA

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
szentpali@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: szenzor, termisztor, bolométer, ellenállás-hőmérő, termikus zaj, 1/f zaj, generációs-rekombinációs zaj

Az ellenállás-hőmérőkön alapuló szenzorok két alaptípusának a termisztornak és a bolométernek zajhatárolt érzékenységeit tárgyaljuk. A vizsgált zajkomponensek a termikus zaj, 1/f zaj és a generációs-rekombinációs zaj. A zaj okozta fluktuációkkal egyenértékű hőmérséklet, teljesítmény és rövid energia impulzus instabilitásokat számítjuk ki olyan működési és jelfeldolgozási sebességet feltételezve, amit a szenzor termikus relaxációja megenged. A számításokat elvégezzük három különböző valós szenzorra is. A fő következtetés az, hogy a miniatűr szenzorok működési sebességét kihasználó alkalmazásokban a termikus zaj a meghatározó. Az ellenállás konstrukciós paraméterei közül, pedig lényeges szerepe van a hőkapacitásnak.

1. Bevezetés

A miniatűr fém, vagy félvezetőellenállás-hőmérőket széles körben alkalmazzák a hőmérséklet mérésére, valamint olyan fizikai, vagy kémiai mennyiségek érzékelésére, melyek hőmérsékletváltozásra konvertálhatóak. Az ilyen szenzorok végső érzékenységét, felbontását szinte minden esetben az ellenállás elektronikus zaja korlátozza. Itt három különböző eredetű zajt vizsgálunk: a termikus, az 1/f és a félvezetőkben megfigyelhető generációs rekombinációs zajt. A miniatűr ellenállások termikus időállandója kicsi, ez lehetővé teszi gyors folyamatok követését. Természetesen ehhez elegendően nagy sávszélességgel kell rendelkeznie a feldolgozó elektronikának is, ami a zajszint növelésével jár együtt, mivel a zaj okozta bizonytalanság monoton függvénye a sávszélességnek.

A két leggyakoribb szenzoralkalmazás a termisztor és a bolométer. A következő fejezetben ezek termikus modelljét tárgyaljuk, ezután pedig sorra vesszük az ellenállás-hőmérők elektronikus zajának egyes komponenseit és kiszámítjuk a hozzájuk tartozó zajhatárolt érzékenységet a termikus időállandónak megfelelő sávszélesség figyelembe vételével. Végül numerikus példaként bemutatunk három valós szenzort.

2. Termikus modellek

Az 1. ábra mutatja a termisztor és a bolométer koncentrált paraméterű hőtechnikai helyettesítő képét. A termisztor esetén az ellenálláshőmérő az R hőellenálláson keresztül kapcsolódik egy hőtartályhoz, melynek hőkapacitása sokkal nagyobb, mint a szenzoré. Ezt a tulajdonságot a $T-T_A$ hőmérsékletet generáló „hőmérsékletforrás” modellezi. A szenzor hőkapacitása C. R_p és C_p az elvezetések hőellenállása és hőkapacitása. Az elvezetések a T_A környezeti hőmérsékleten lévő feldolgozó elektronikához kapcsolják az ellenállás-hőmérőt.

A $P_i = i^2 R$ hőáram-generátor az ellenállás értékét kiolvasó i mérőáram keltette Joule hőt írja le, ahol R a ellenállás-hőmérő elektromos ellenállása. T_m az izotermikusnak tekintett ellenállás hőmérséklete. Hőmérő alkalmazásnál az érzékelendő mennyiség a T hőmérséklet [1], ennek abszolút pontossága a fontos. Számos esetben viszont az R hőellenállás értéke jellemzi a mérendő fizikai mennyiséget, például a miniatűr Piranni-féle vákuummérőknél [2-3], amikor a fűtött szenzor hűlése a vákuum javulásával egyre csökken.

Egy másik megoldás szerint [4-5] a szenzorral egy különálló fűtőtest hőmérsékletét érzékeljük, ekkor is R jellemzi a vákuum értékét, de ez az elrendezés alkalmas gázok, vagy folyadékok áramlási sebességének a mérésére is [6-8]. De akár a szívverés üteme is érzékelhető hőmérsékletméréssel [9]. Ezekben az esetekben viszont a T hőmérséklet abszolút értéke kevésbé fontos, a mérés pontosságát T_m meghatározásának a felbontása határozza meg. Stacionárius körülmények közt az ellenállás-hőmérő hőmérséklete:

$$T_m = T - R \frac{T - T_A}{R + R_p} + R \frac{R_p}{R_p + R} P_i \quad (1)$$

vagy

$$T - T_m = \frac{R}{R + R_p} (T - T_A - R_p P_i) \quad (2)$$

Ha T ugrásszerűen megváltozik $\Delta T \ll T$ értékkel, akkor az új egyensúly exponenciálisan áll be:

$$T_m + \Delta T_m = T_m + (\Delta T - R \frac{\Delta T}{R + R_p}) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (3)$$

ahol

$$\tau_1 = \frac{RR_p(C + C_p)}{R + R_p} = \frac{RR_p C^*}{R + R_p} \quad (4)$$

Egy ideális hőmérő esetén $R=0$, ezért $T_m=T$, $\tau_1=0$. Továbbá ebben az ideális esetben a P_i Joule hő nem befolyásolná T_m -t, hiszen a végtelen hőkapacitású hőtartály – a hőmérsékletforrás – hőmérséklete nem vál-

tozik meg a véges P_i teljesítménytől, ezért a kiolvasó áram értéke sem korlátozott. Természetesen ilyen ideális hőmérő nem létezhet, de az igaz, hogy pontos hőmérsékletmérésről csak akkor lehet szó, ha $R \ll R_p$. (2) és (3) alapján belátható, hogy R_p hatása úgy is csökkenthető, ha $T_A - T$ kicsi. Ezt el lehet érni, ha az elvezetéseket T -hez közeli hőmérsékleten termalizáljuk [3].

Ebben az esetben:

$$\tau_1 \approx RC^* \quad (5)$$

Természetesen minél kisebb τ_1 annál pontosabban tudjuk követni T gyors változásait.

A másik vizsgált konfiguráció a bolométer, ennek termikus helyettesítő képe látható az 1/b. ábrán. Ekkor T_m a ellenállás-hőmérő által abszorbeált teljesítményre jellemző. Ilyenek például a katalitikus gázérzékelők [10-12], a sugárzás detektorok [13-15] stb.

Stacionárius esetben:

$$T_m = T_a + R_p(P + P_i) \quad (6)$$

Ha P ugrásszerűen megváltozik ΔP értékkel, akkor az okozott hőmérsékletváltozás:

$$\Delta T_m(t) = R_p \Delta P (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (7)$$

ahol

$$\tau_2 = R_p(C + C_p) = R_p C^* \quad (8)$$

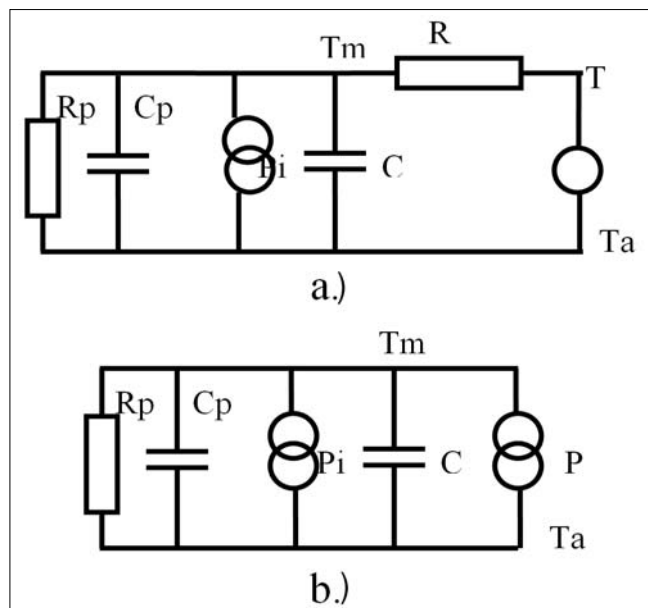
Egy másik lehetséges kérdés a szenzor válasza egy rövid energia impulzusra, melynek időtartama kisebb, mint τ_2 . Ebben az esetben:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta E}{C^*} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (9)$$

ahol ΔE az impulzus teljes energiája.

1. ábra Termikus helyettesítő képek

a) a termisztor eset – a szenzor T hőmérsékletű hőtartályhoz csatlakozik b) a bolométer kapcsolás – az ellenállás-hőmérő abszorbeálja a P teljesítményt, ami a mérendő mennyiség.



Ahogy már volt róla szó R_p és C_p az elvezetések, tartóelemek, kitámasztók stb. egyenértékű eredő hőkapacitását és hőellenállását jelentik. A hőmérő esetben ezek parazita elemeknek számítanak, értéküket minimalizálni kell ahhoz, hogy a hőmérsékletmérés pontosságát növeljük. A bolométer esetben viszont más a helyzet, nagy R_p (jó hőszigetelés) a kívánatos az érzékenység növelése céljából, ugyanakkor C_p -t kis értéken kell tartani, hogy csökkentsük a válaszüjtőt és növeljük az érzékenységet a rövid energia impulzusok detektálásánál.

R_p és C_p értéke kiszámítható a konstrukciós anyagok és geometriák alapján [2]. Természetesen a számításoknak a hőáramokon és a hőfelhalmozódásokon kell alapulnia. Egy egyenletes keresztmetszetű vezeték – mely mentén a hőmérséklet lineárisan változik – hőkapacitása a geometriai adatokból számítottak csak a fele, hasonlóan az elvezetéseknek az említett termalizálása megnöveli R_p értékét stb. Túl ezeken az a priori módszerekben R_p és C_p értéke kísérletileg is meghatározható. Például R (1) alapján számítható, ha valamilyen független mérésből T és T_A ismert. Elvben R meghatározható egy olyan mérősorozat határértékeként is amikor egyenletes lépésközlőként növeljük a hőszigetelést. Általában a τ értékek közvetlenül mérhetők az ugrásszerű hőmérsékletváltozást követő relaxáció alapján; hőmérséklet ugrást mérő áram növelésével kényelmesen előidézhetjük. A miniatűr kerámia tokozású platina ellenállás-hőmérők esetén a javasolt eljárás az ugrásszerű hőmérsékletváltozás létrehozásáról az, hogy a hőmérőt áramló forró vízbe mártják [16].

3. Az elektromos jel

Az ellenállás-hőmérő elektromos ellenállásának a hőmérséklet okozta változása:

$$r_2 = r_1(1 + \alpha(T_{m2} - T_{m1})) = r_1(1 + \alpha\Delta T) \quad (10)$$

ahol r_1 és r_2 az elektromos ellenállás T_{m1} és T_{m2} hőmérsékleten. Kis ΔT esetén α hőmérsékletfüggésétől eltekinthetünk és a (10) szerinti lineáris összefüggést alkalmazhatjuk. Meg kell itt jegyezni, hogy a közelítésünk szerint a hőmérő-ellenállás izotermikus. Természetesen ez nem valósulhat meg tetszőleges pontossággal. Gondolatmenetünk viszont érvényes marad, ha T_m az ellenállás olyan módon képzett átlaghőmérséklete, hogy az átlagolás a (10) egyenlet érvényességét megőrzi. Ilyen lehet például lineáris szerkezet esetén az, ha a hőmérséklet átlagolásánál az egyes szakaszok az elektromos ellenállásukkal súlyozódnak stb.

A fenti egyenletből következik, hogy az ellenállás hőmérsékletének változása arányos az ellenállás relatív változásával. Az ellenállás változást állandó árammal való meghajtással olvassuk ki, és ekkor a hőmérsékletváltozás a feszültség relatív megváltozásával lesz arányos:

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta r}{r_m} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta U}{U} \quad (11)$$

ahol $U = r_m i$.

Az elektromos jelfeldolgozás sávszélessége fontos paraméter. A fenti τ időállandók megszabják a szenzor működési sebességét, ez a szóban forgó miniatűr szenzorok esetén a konstrukciótól függően akár hat nagyságrendet is változhat a s... μ s tartományban. Ezt a sebességet úgy lehet optimálisan kihasználni, ha a jelfeldolgozó áramkör sávszélessége is illeszkedik a feladathoz. Egy másik ok a nagysebességű jelfeldolgozásra a sok szenzort tartalmazó rendszerek esete, amikor a kiolvasás sorosan történik [17], de jelen dolgozatban ezzel a kérdéssel nem foglalkozunk.

A numerikus szimuláció szerint [18] a τ időállandóval exponenciálisan relaxáló folyamatot $f=1/\tau$ sávszélességű elektronikán átvezetve a kimenet körülbelül 5% pontosságon belül követi a bemenet jelalakját, legalábbis a relaxáció kezdetén. A $t \geq 2\tau$ esetén nagyobb relatív eltérések is felléphetnek, de ekkor már a relaxáció előrehaladott, maga a jel is kicsiny. A sávszélesség megfelezése már 15% körüli eltérést eredményez, megkésztetése viszont a pontosságot is javítja 2,5% körüli értékre. Az általánosság kedvéért a továbbiakban a sávszélességet w/τ alakban fejezzük ki, ahol w tetszőleges szám, minél nagyobb annál pontosabb, de annál zajosabb is a kimenő jel. Gyakorlatban 1 és 2 közti w érték már használható pontosságot ad.

A következőkben a szenzor működési sebességéhez illeszkedő w/τ_1 , illetve w/τ_2 sávszélességű elektronika esetén számítjuk ki a zajjal egyenértékű δT , δP , illetve δE értékeket az ellenálláson fellépő zaj mechanizmusok esetén. Ezek az értékek még nem adják a mérés pontosságát, illetve felbontását. Ahhoz, hogy szignifikánsan érzékeljünk egy jelet, vagy két mérés közötti különbséget (felbontás) legalább kétszer ekkora jelre van szükség. Ha az eredetileg a mikrohullámú detektor diódák minősítésére bevezetett, úgynevezett „tangenciális érzékenység” definíciót [19] alkalmazzuk a jelnek a zajból való kiemelkedésére, akkor a zajjal egyenértékű jel 2,5-szerese számít szignifikánsnak.

4. A termikus zaj hatása

A termikus zaj, vagy másként Johnson, illetve Nyquist zaj eredete a mozgékony töltéshordozók termikus mozgása. Ez a zaj a szóba jöhető frekvencia tartományban „fehér zaj”, azaz az egységnyi sávszélességre eső zajteljesítmény állandó, nem függ a frekvenciától. A levágási frekvencia a terahertz tartományban van [20]. A mérési módszertől függően áram, vagy feszültség fluktuációt, esetleg mindkettőt okoz, itt most összhangban (11)-gyel a feszültségmérés esetét tárgyaljuk, az árammérés esete hasonlóan tárgyalható. A feszültség varianciája az ellenállás-hőmérő kapcsain:

$$\overline{(U - \bar{U})^2} = \delta U^2 = 4kT_m r_m \Delta f \quad (12)$$

ahol a felső vonás átlagolást jelent, Δf pedig a mérés sávszélessége. A négyzetgyöke a varianciának a szórás, az úgynevezett „termikus feszültség”:

$$\delta U = \sqrt{4kT_m r_m \Delta f} \quad (13)$$

Ez a feszültség fluktuáció az előfeszítéstől függetlenül van jelen a terheletlen ellenállás kapcsain. (11) szerint a hőmérsékletmérés pontossága nagyobb, ha ez a feszültség az ellenállás előfeszítéséből adódó feszültséghez, a jelhez képest kicsi. Tehát az ellenálláson átfolyó áram növelésével nő a pontosság. Az áramnak a Joule hő szab határt, ez stacionárius esetben dT hőmérsékletemelkedést okoz az ellenállás-hőmérőn:

$$dT = i^2 r_m \frac{RR_p}{R + R_p} \quad (14)$$

Ésszerű követelmény, hogy dT legyen kicsiny $T - T_m$ -hez képest:

$$dT \leq p(T - T_m) \quad (15)$$

ahol p egy kis szám; a mérés pontosságát fejezi ki. (14) és (15) alapján meghatározhatjuk a mérőáram maximálisan megengedett értékét, illetve az ellenálláson eső feszültséget:

$$U_o = \sqrt{\frac{pr_m(R + R_p)(T - T_m)}{RR_p}} \quad (16)$$

Ehhez a feszültséghez kell viszonyítani a (13) szerinti termikus fluktuációt, hogy hőmérsékletmérésnek a termikus zajjal egyenértékű bizonytalanságát megkapjuk:

$$\begin{aligned} \delta T_t' &= \frac{1}{\alpha} \frac{\delta U}{U_o} = \frac{1}{\alpha} \frac{\sqrt{4kT_m r_m w / \tau_t}}{U_o} = \\ &= \frac{2}{\alpha} \sqrt{\frac{w}{p}} \sqrt{\frac{kT_m}{C^*(T - T_m)}} \end{aligned} \quad (17)$$

Érdemes megjegyezni, hogy ez a fluktuáció nem függ r_m , R és R_p aktuális értékeitől, a pontosságot kifejező konstansoktól eltekintve csupán a termikus energia és a C^* hőkapacitásban felhalmozott hőenergia viszonya határozza meg.

Bolométer elrendezés esetén a termikus zajjal egyenértékű teljesítmény:

$$\begin{aligned} \delta P_t &= \frac{\delta T_t'^2}{R_p} = \frac{1}{\alpha R_p} \frac{\delta U^2}{U_o^2} = \frac{1}{\alpha R_p} \frac{4kT_m r_m w / \tau_b}{ir_m^2} = \\ &= \frac{2\sqrt{wkT_m}}{i\alpha R_p^{3/2} \sqrt{r_m C^*}} \end{aligned} \quad (18)$$

A bolométer esetén az ellenálláson átfolyó áramot a működés feltételei szerint kell megválasztani, az ellenállás hőmérséklete sok esetben erősen különbözik a környezet hőmérsékletétől. Például a katalitikus gázdetektorok működési hőmérséklete 500°C körül van [12], ezt a hőmérsékletet az i mérőárammal állítják be.

Másik szélső eset a szupravezető bolométer, ahol pedig arra kell figyelemmel lenni, hogy a mérőáram mágneses tere ne okozzon kiugrást a szupravezető állapottól [13].

Hasonló módon a rövid energia impulzusra vonatkozó termikus zajjal egyenértékű bizonytalanság:

$$\begin{aligned}\delta E_t &= \delta T_t^b C^* = \frac{C^*}{\alpha} \frac{\delta U}{U} = \frac{C^*}{\alpha} \frac{\sqrt{4kT_m r_m w}}{ir_m \sqrt{R_p C^*}} = \\ &= \frac{2\sqrt{wkT_m C^*}}{i\alpha \sqrt{r_m R_p}}\end{aligned}\quad (19)$$

5. Az 1/f zaj

Az 1/f, vagy flicker zaj minden ellenálláson megfigyelhető. Eredete az ellenállás fluktuációja, konkrétan a mozgékony fluktuációja. A jelenleg leginkább elfogadott elmélet szerint a fononok eloszlása mutat ilyen jellegű fluktuációt és a mozgékony töltéshordozóknak a fononokon való szóródása okozza a mozgékony fluktuációját [21]. Mivel magának az ellenállásnak a zajáról van szó hatását nem lehet csökkenteni az előfeszítés növelésével. Az 1/f zaj spektruma:

$$\frac{\delta r^2}{r^2} = \frac{C_{1/f}}{f} \quad (20)$$

A dimenzió nélküli szám $C_{1/f}$ a zaj amplitúdója, δr^2 pedig az ellenállás varianciájának spektrális sűrűsége. A (20) szerinti összefüggés alapján összehasonlíthatóak, illetve megjósolhatóak az ellenálláson megjelenő 1/f zajnak a nagysága különböző frekvenciatartományokban, illetve előfeszítéseknél. Fém és félvezető anyagú ellenállások esetén az úgynevezett Hooge-reláció [22] is teljesül:

$$C_{1/f} = \frac{\alpha_H}{N} \quad (21)$$

itt α_H az úgynevezett Hooge-állandó és N az ellenállásban lévő mozgékony töltéshordozók száma. α_H nem univerzális természeti állandó, ahogy azt kezdetben gondolták, amikor Hooge felfedezte ezt az empirikus összefüggést. 0.1 to 10^{-8} közötti α_H értékeket publikáltak. Különböző anyagokon végzett mérések alapján [23], a legnagyobb értékeket erősen inhomogén, rendezetlen anyagokon tapasztalták.

Ahogy a (20) összefüggés egységesen tudja kezelni egyforma ellenállások különböző körülmények közt megfigyelt zaját, a (21) összefüggés további általánosításra ad lehetőséget. Azonos anyagból készült különböző mennyiségű töltéshordozót tartalmazó, azaz más-más térfogatú ellenállások zaját lehet egységesen kezelni. Egyúttal az is világos, hogy a nagyobb térfogatú ellenállások 1/f zaja kisebb. Ez a tapasztalat az elektronikai gyakorlatban is jelen van: a kiszájú áramkörökbe általában jóval nagyobb teljesítményű ellenállásokat építenek be, mint amit az ott képződő Joule hő indokol.

Meg kell itt jegyezni, hogy a MOS tranzisztorok csatornában tapasztalható 1/f zaj eredete nem okvetlenül a töltéshordozók szóródásának fluktuációja, hanem lehet a töltéshordozó számának a változása is, nevezetesen az oxid rétegben lévő csapdák betöltődése és kiürülése változtatja a tértöltési tartomány szélességét [24].

Jelen dolgozatban ezzel az effektussal nem foglalkozunk, csak a Hooge típusú ellenállás zaj hatását vizsgáljuk.

Az 1/f típusú zajjal kapcsolatban a közismert probléma az, hogy mind (20) szerinti spektrális sűrűségnek a divergenciája $f \rightarrow 0$ esetén. Az ellenállás teljes varianciája, a spektrum integrálja logaritmusfüggvény, ez is divergál mind $f \rightarrow 0$, mind a nagy frekvenciák esetén. Jelenleg az elméleti fizikusok többsége meg van győződve arról, hogy valahol az alacsony frekvenciák tartományában a zaj spektrum a telítés felé tendál és a magas frekvenciák tartományában pedig a csökkenés 1/f-nél gyorsabbra vált. Kísérletileg még a spektrumnak egyik oldalán sem sikerült megfigyelni ilyen jellegű elhajlást, sőt az az általános laboratóriumi tapasztalat, hogy minél szélesebb frekvencia tartományban vizsgálják a zajt annál jobban írja le a (20) egyenlet a spektrumot. (A sáv szélesség növelésével a mért spektrumoknál a frekvencia kitevője egyre pontosabban közelíti meg a -1 értéket.)

A gyakorlatban ugyanakkor ez gyenge divergencia nem okoz nagy problémát, hiszen minden szóba jöhető szenzorműködés, mérés stb. véges frekvencia tartományban történik. Az ellenállás varianciája az f_1 és f_2 határfrekvenciák közti sávban:

$$\delta r^2 = r^2 C_{1/f} \int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{f} = r^2 C_{1/f} \log_e \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad (22)$$

Az f_2 értékét vehetjük w/τ -nak, mint a jelfeldolgozás sávjának célszerűen választott felső határát. f_1 lehet például a megfigyelési idő reciproka, $f/f_1 = B$ a relatív sáv szélesség. Ezzel a jelöléssel (22) alapján az ellenállás relatív fluktuációja:

$$\frac{\delta r}{r} = \sqrt{C_{1/f} \log_e B} \quad (23)$$

A logaritmus és a négyzetgyökképzés miatt ez a relatív fluktuáció igen gyengén függ B -től. Például $B=10^3$, 10^6 és 10^9 esetén (23)-ban a $\sqrt{C_{1/f}}$ szorzója rendre 2,6, 3,7 és 4,5. Legtöbb esetben $\sqrt{C_{1/f}}$ sem ismert olyan pontossággal, hogy e szorzótényezők közti különbség fontos legyen.

Mivel az 1/f zaj hatása teljesen független a frekvencia abszolút értékétől, ezért ezt a zajkomponenst nem érdemes alapul venni az elektronika sáv szélességének a meghatározásánál. Mint a numerikus példánál látni fogjuk, az 1/f zaj a gyorsműködésű, szélessávú jelfeldolgozás esetén elhanyagolható a termikus zajhoz képest. Alacsony frekvenciákon, szűk sávú jelfeldolgozásnál jön szóba, amikor a termikus zaj hatása kisebb lesz, mint az 1/f zajé.

Behelyettesítve (23)-t és (21)-t (11)-be, megkapjuk az 1/f zajjal egyenértékű hőmérséklet bizonytalanságot a termisztor elrendezés esetén

$$\delta T_{1/f}^t = \frac{3.7 \sqrt{C_{1/f}}}{\alpha} = \frac{3.7 \sqrt{\alpha_H}}{\alpha \sqrt{N}} = \frac{3.7 \sqrt{\alpha_H}}{\alpha \sqrt{nV}} \quad (24)$$

ahol n a szabad elektron koncentráció, V pedig a szenzor térfogata. Itt és a továbbiakban a numerikus faktort 3,7-nek vesszük, azaz $B=10^6$ feltételezéssel élünk.

Bolométer konfiguráció esetén:

$$\delta P_{1/f} = \frac{\delta T_{1/f}^b}{R_p} = \frac{1}{R_p} \frac{3.7\sqrt{\alpha_H}}{\alpha\sqrt{nV}} \quad (25)$$

Míg a rövid energiaimpulzusra vonatkozóan:

$$\delta E_{1/f} = \delta TC^* = C^* \frac{3.7\sqrt{\alpha_H}}{\alpha\sqrt{nV}} \quad (26)$$

6. A generációs-rekombinációs zaj

Félvezető anyagokban a töltéshordozók száma fluktuálhat a csapdába való befogás, illetve onnan való emisszió miatt. Ez a folyamat az ellenállás fluktuációjához vezet. Ez a fajta zaj nem lép fel fémekben, sőt, mint alább szó lesz róla eszközminőségű szilíciumban sem észlelhető, a vegyület-félvezetőkben viszont előfordul. Itt a teljesség kedvéért foglalkozunk vele.

A csapda állapoton keresztül történő töltéshordozó generáció-rekombináció termikusan aktivált véletlen folyamat, melynek során az egyensúlytól való eltérések τ_{g-r} időállandójú exponenciális relaxációval csökkennek. Ennek a folyamatnak a zajspektruma Lorentz-görbe [25]:

$$\frac{\delta r^2}{r^2} = \frac{M\tau_{g-r}}{1 + (2\pi\tau_{g-r}f)^2} \quad (27)$$

ahol τ_{g-r} az említett karakterisztikus relaxációs idő, a dimenziótan M szám pedig ennek a zajnak az amplitúdója. Abban az esetben, ha több csapda nível szimultán hatását kell figyelembe venni, akkor az eredő spektrum lehet a több különböző M és τ_{g-r} paraméterekkel jellemzett Lorentz görbék összege, de bizonyos esetekben lehet egy eredő Lorentz görbe is, kevert paraméterekkel [26-27]. Itt csak az egy Lorentz görbével jellemezhető zajspektrum hatását tárgyaljuk.

A töltéshordozó szám (27) szerinti fluktuációja véges sávszélességben az ellenállás alábbi varianciáját okozza:

$$\frac{\delta r^2}{r^2} = \int_0^f \frac{M\tau_{g-r}}{1 + (2\pi\tau_{g-r}f')^2} df' = \frac{M}{2\pi} \cdot \arctg(2\pi\tau_{g-r}f) \quad (28)$$

A 2. ábra mutatja a (27) szerinti zajspektrumot a két korábban tárgyalt zajkomponens spektrumával együtt. Az ábrán a (28) szerinti $\arctg$ függvényt is ábrázoltuk. Látható, hogy az integrált variancia $f \ll 1/2\pi\tau_{g-r}$ esetén lineáris függvénnyel közelíthető, míg magas frekvenciákon a $\pi/2$ telítési értékhez tart.

A zaj-egyenértékű fluktuációkat a két esetre külön fogjuk kiszámolni.

Alacsony frekvenciákon az ellenállás relatív fluktuációja:

$$\frac{\delta r}{r} = \sqrt{Mw \frac{\tau_{g-r}}{\tau_i}} \quad (29)$$

Az ehhez tartozó bizonytalanság a termisztor konfiguráció esetén (30):

$$\delta T_{g-r}^t = \frac{1}{\alpha} \sqrt{Mw \frac{\tau_{g-r}}{\tau_i}} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{Mw \tau_{g-r} \frac{R + R_p}{RR_p C^*}}$$

bolométer konfigurációban (31):

$$\delta P_{g-r} = \frac{1}{\alpha R_p} \sqrt{Mw \frac{\tau_{g-r}}{\tau_b}} = \frac{1}{\alpha R_p} \sqrt{Mw \frac{\tau_{g-r}}{R_p C^*}}$$

és rövid energia impulzusokra vonatkoztatva:

$$\delta E_{g-r} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{Mw \tau_{g-r} C^*}{R_p}} \quad (32)$$

$f \gg 1/2\pi\tau_{g-r}$ frekvenciákon a $g-r$ zaj okozta variancia telítődik. Hatása ebben a tartományban már állandó és frekvencia független. Hasonló módon lehet tárgyalni, mint az $1/f$ zaj frekvencia független járulékát.

A δ mennyiségeket megkapjuk, ha a (24), (25) és (26) egyenletekben a $3.7\sqrt{C_{1/f}}$ numerikus faktort kicseréljük $\sqrt{M}/2$ -re. Így:

$$\delta T_{g-r}^t = \frac{\sqrt{M}}{2\alpha} \quad (33)$$

$$\delta P_{g-rs} = \frac{\delta T^b}{R_p} = \frac{\sqrt{M}}{2R_p\alpha} \quad (34)$$

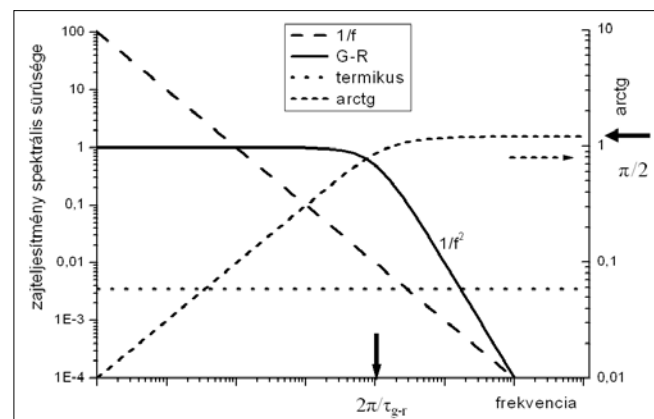
$$\delta E_{g-rs} = \delta T^b C^* = C^* \frac{\sqrt{M}}{2\alpha} \quad (35)$$

7. Valós szenzorok

Ebben a fejezetben három különböző szenzort mutatunk be konkrét adatokkal. Az első példa egy szabadon álló pellisztor [12]. Ez egy SiO_2 réteggel fedett Si szelre porlasztással felvitt meander alakú Pt ellenállás, mely alól a Si-ot mélyen kimarták és így „szabadon áll”, hőkontaktusa a környezethez gyenge. Bolométer üzemmódra tervezték, levegőbe kerülő éghető gázok kimutatására, illetve koncentrációjának a mérésére.

18 mW fűtőteljesítmény a Pt ellenállást 570°C -ra hevíti fel. A hőkapacitása $41,57 \text{ nJ/K}$, a környezet felé való hőellenállása $R_p = 26,9 \text{ K/mW}$, $\tau_2 = 1.15 \text{ ms}$ [12].

2. ábra
Különböző zajkomponensek viszonya és az $\arctg$ függvény



A működési hőmérsékleten az elektromos ellenállása $r_m = 411 \, \Omega$, $\alpha = 6.63 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Megjegyezzük, hogy a porlasztott fém vékonyrétegek szerkezete sok szerkezeti hibát tartalmaz és ezért fajlagos ellenállásuk nagyobb, α értékük pedig kisebb, mint a jól temperált huzaloké. $w=1$ választás mellett a termikus zajjal egyenértékű bizonytalanságok: $\delta P_{th} = 2.6 \text{ nW}$ és $\delta E_{th} = 2.9 \text{ pJ}$.

Ez az eszköz nem igazán alkalmas a hőmérséklet abszolút mérésére, mert R_p viszonylag kicsiny és ezzel a kisfelületű eszközzel nehéz lenne olyan R hőellenállást kialakítani egy hőtartály felé, hogy $R \ll R_p$ teljesüljön. Olyan szenzoroknál, mint például áramlásérzékelés, vákuummérés [8,10] stb., amikor a hőmérséklet abszolút értéke nem fontos, a hőmérsékletmérés felbontását megbecsülhetjük (17) alapján. Tegyük fel, hogy $R=R_p$, ami nagyságrendileg reális, továbbá legyen $T_A = 300 \text{ K}$, $T=350 \text{ K}$, így $T_m=325 \text{ K}$, $w=1$ ismét és $p=0.1$. Ekkor $\delta T_{th} = 6.3 \cdot 10^{-4} \text{ K}$.

Az $1/f$ zaj hatásának becsléséhez ismerni kell $C_{1/f} = \alpha_H/N$ értékét. A porlasztott Pt rétegeken mért α_H értékek 10^{-4} től $2 \cdot 10^{-3}$ közt változnak [28], ezek a számok a mintában lévő atomok számához tartoznak és nem a mozgékony elektronok számához, ez utóbbit ugyanis fémeknél a bonyolult Fermi felületek miatt nehéz megbecsülni. Meg kell még jegyezni itt, hogy az idézett irodalmi α_H mérések a szóban forgó pellisztornál sokkal kisebb térfogatú mintákon történtek. (Magunk képtelenek voltunk a pellisztoron végzett zajmérésnél az $1/f$ zajspektrumot észlelni.)

A pellisztor tömege $2.33 \cdot 10^{-8} \text{ g}$ [29], ebből az adatból és a legnagyobb közölt α_H értékből számolva $C_{1/f} = 2.8 \cdot 10^{-17}$. Esetünkben a felső frekvenciahatár kHz-es nagyságrendű, $B=10^6$ választással az alsó frekvenciahatár már a mHz tartományba kerül. (24), (25) és (26) egyenletek szerint: $\alpha T_{1/f} = 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ K}$, $\delta P_{1/f} = 1 \text{ nW}$ és $\delta E_{1/f} = 1.2 \text{ pJ}$. Ezek az értékek kisebbek, mit a termikus zaj okozta bizonytalanságok.

A két független zaj mechanizmus okozta δT eredőjét az alábbi módon számolhatjuk ki:

$$\delta T = \sqrt{(\delta T_{th})^2 + (\delta T_{1/f})^2} \quad (36)$$

és hasonló módon a δP és δE mennyiségeket. Jelen esetben 0.63 mK , 2.8 nW és 3.1 pJ értékek adódnak.

Érdemes megemlíteni itt egy másik, a degradációval összefüggő zajt is. Arról van szó, hogy a vékony fémrétegeken elektromigráció lép fel, ami végül is tönkremenetelhez vezet. A jelenséget részletesen VLSI áramkörök Al vékonyrétegből kialakított összeköttetései esetén. A degradáció folyamán megnövekedett alacsonyfrekvenciás zajt lehet mérni, melynek spektruma $1/f^Y$ jellegű, Y tipikus értéke 2 [30-31], de minden esetben nagyobb 1-nél [32]. Ez a jelenség kívül esik jelen dolgozat tárgykörén, említése éppen a világos elhatárolódás miatt történik.

A második példa egy kereskedelmi forgalomban kapható miniatűr Pt ellenállás hőmérő, melynek ellenállása 0°C -on $100 \, \Omega$, és szobahőmérséklet környékén $\alpha = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Az ellenállás egy $2,3 \text{ m}$ hosszú, $50 \, \mu\text{m}$ átmérőjű Pt huzal, melyet 15 mm hosszú és $1,6 \text{ mm}$ átmérőjű porcelán rudacskába tokoztak be. A Pt tömege kb. 0.1 g . A gyári adatok szerint áramló forró vízbe mártva $\tau_i = 0.4 \text{ s}$, az önfűtése, azaz R , pedig kisebb, mint 0.015 K/mW . Ezekből az adatokból: $C = 26.6 \text{ mJ/}^\circ\text{C}$. Az áramló vizes mérési elrendezésben a kivezetések is felveszik a mérendő közeg hőmérsékletét, azaz $T=T_A$. A szabványos hőmérséklet mérési hiba 325 K környékén $0,2 \text{ K}$ [16]. $i = 3 \text{ mA}$ kiolvasó áram még nem okoz nagyobb hőmérséklet emelkedést, mint $0,02 \text{ K}$. Ezért ez a meghajtás a mérés pontosságát nem befolyásolja akkor sem, ha a szabvány által megengedett toleranciát a gyártási szóras már kihasználta.

Feltételezve megint $T = 350 \text{ K}$, $T_A = 300 \text{ K}$ és $w = 1$, a következőket kapjuk: $\delta T_i = 1.67 \, \mu\text{K}$, $\delta P_i = 111 \text{ nW}$ és $\delta E_i = 44 \text{ nJ}$. Ez egy precíz hőmérő, annak is gyártják és árulják. Bolométerként a nagy hőkapacitás miatt gyenge teljesítményt nyújtana és lassú lenne. A nagy térfogat miatt az $1/f$ zaj elhanyagolható.

A harmadik példa egy ion implantált Si ellenállás, mely a nyomásszenzor chip hőmérsékletét méri [33,34]. Az ellenállás-hőmérő egyszerre készül az ugyancsak B implantált piezo-ellenállásokkal, ezért paraméterei nem optimalizáltak a hőmérsékletmérés szempontjából. Az ellenállás U alakú, a két $150 \, \mu\text{m}$ hosszú szakaszt egy $40 \, \mu\text{m}$ -es szakasz köti össze az egyik oldalon. A vonalak szélessége $20 \, \mu\text{m}$. Az implantált adalékprofil Gauss-eloszlású, $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ felületi koncentrációval és $2,3 \, \mu\text{m}$ mélységgel. Szobahőmérsékleten az ellenállások értéke $2,3 \text{ k}\Omega$, $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Magától értetődően a R értéke kicsiny, hiszen az ellenállást elektromos szempontból határoló p-n átmenet nem képez gátat a hőáramlásnak. Ahhoz, hogy R értékét mégis megbecsülhessük az elektromos terjedési ellenállás mérését használtuk fel. Merve a p-n átmenet nyitó irányú karakterisztikáját a soros ellenállás $21 \, \Omega$ -nak adódott, ennek analógiájára a hőellenállás $R = 5 \text{ K/W}$. A hőkapacitás a geometriai adatok és anyagi állandók alapján $C = 25,5 \text{ nJ/K}$. A C_p a környezet felé való terjedési ellenállással érintett térfogatból képződik. Heurisztikus becsléssel $C_p = 2C$ értékkel számolunk. A kis R érték miatt az eszköz termikus relaxációja igen gyors, $\tau_i = 0.36 \, \mu\text{s}$. (Ez az oka annak, hogy R -t és C_p indirekt módon becsültük meg, ugyanis a relaxáció direkt mérése túl nagy és gyors felfutású hőimpulzust és kb. 10 MHz sáv szélességű precíz ellenállásmérést igényelne.) Az ellenállás sarkait párologtatott Al vezetékek vezetnek el a bondoló felületekhez. Ezek a vezetékek a chip felületén vannak (igen vékony oxid réteggel elválasztva a Si-től), ezért hőmérsékletük minden pontban azonosnak vehető a hordozó hőmérsékletével, ezeken keresztül az ellenállás-hőmérő hőcseréje elhanyagolható, R_p gyakorlatilag végtelen, legalábbis R -hez képest annak tekinthető. Az alkalmazás során 1 mA árammal olvassák ki az ellenállás értékét.

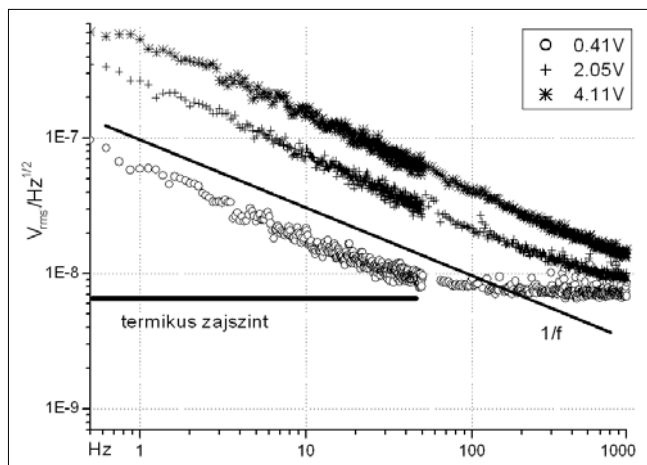
Ezen adatok alapján a termikus zaj okozta fluktuációk: $\delta T_i = 5 \text{ mK}$, $\delta P_{th} = 1 \text{ mW}$ és $\delta E = 127.5 \text{ pJ}$. Ez az esz-

köz ismét egy precíz hőmérő, bolométernek nem alkalmas a túl kicsi R miatt. Ahogy az első példánál láttuk ilyen típusú ellenállások esetén az R -t mikrogépészeti módon, a jól vezető Si-tól való elválasztással lehet növelni.

Az ellenállás alacsonyfrekvenciás zaját mutatja a 3. ábra. Generációs-rekombinációs zaj nem észlelhető, a termikus és az $1/f$ zajkomponensek jelennek meg. Ez utóbbi amplitúdója $C_{1/f} = 1,6 \cdot 10^{-14}$. Ennek alapján az előbbi paraméterekkel számolva $\delta T_{1/f} = 0.29$ mK, ami elhanyagolható a termikus zajból eredő bizonytalansághoz képest. Amennyiben viszont nem használjuk ki az eszköz μ s-nál kisebb válaszüvegét és csökkentjük a jelfeldolgozás sávszélességét, akkor az $1/f$ zaj komponens érvényre jut, hiszen ennek hatása nem függ a frekvencia abszolút értékétől.

3. ábra

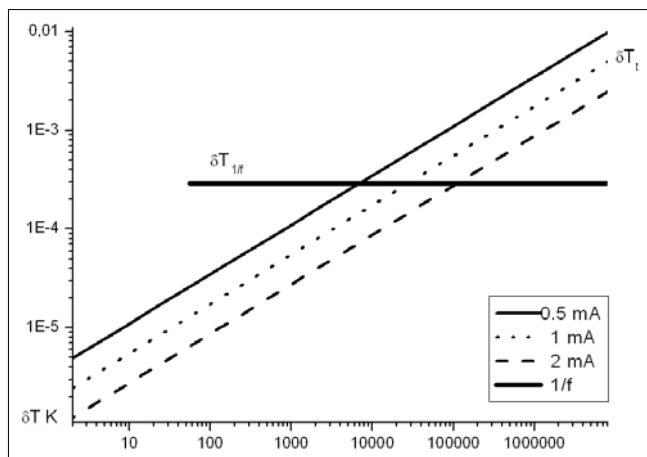
Az ion-implantált ellenállás alacsonyfrekvenciás zajspektruma. A folytonos vonal az $1/f$ lecsengésnek felel meg, az ezzel párhuzamos zajspektrumok az előfeszítéssel arányosan tolódnak el, bizonyítva azt, hogy a zaj eredete az ellenállás fluktuációja.



A 4. ábra mutatja az eszköz zaját a jelfeldolgozás sávszélességének függvényében. Nagy sávszélességnél a termikus zaj a domináns, ha a sávszélességet kellően lecsökkentjük, akkor hatása kisebb lesz mint az $1/f$ zajé. Ez utóbbi jelenti a δT végső korlátját, a minimum értéket.

4. ábra

δT_i és $\delta T_{1/f}$ az ion-implantált ellenállás előfeszítéseinél a jelfeldolgozó elektronika sávszélességének függvényében.



8. Összefoglalás

A ellenálló-hőmérőkön alapuló szenzoralkalmazások zajhatárolt érzékenységeit tárgyaltuk. Az alkalmazások szempontjából a két alaphelyzetet, a termisztort és a bolométert vizsgáltuk, a zajkomponensek közül pedig a fém és félvezető anyagú ellenállásokban előforduló zajkomponenseket: a termikus zajt, az $1/f$ fluktuációt és a generációs-rekombinációs zajt. A zajegyenértékű jeleket olyan sávszélességű feldolgozásnál számítottuk ki, melyek nem csökkentik a miniatűr szenzorokkal elérhető sebességet. A számításokat alkalmaztuk három valós szenzorra is.

Általános következtetésként azt lehet levonni, hogy a miniatűr szenzorok hőrelaxációs ideje által megengedett működési sebesség esetén a meghatározó zajkomponens a termikus zaj. A termikus zaj állandó értékű, ezért hatása az előfeszítés növelésével csökkenthető, ennek ára az, hogy a képződő Joule hő melegíti az ellenállást. Egyes bolométer alkalmazásokban viszont szükség is van az ellenállás fűtésére. Az $1/f$ zaj csak csökkentett sávszélességeknél jön komolyan szóba.

A hőmérsékletmérés hibája és a bolométer által érzékelhető minimális teljesítmény kisebb, ha a szenzor hőkapacitása, azaz a térfogata nagyobb. Természetesen a nagyobb hőkapacitás lassúbb működést jelent. A rövid energiimpulzus érzékelésének felbontása viszont szemléletes módon kisebb hőkapacitású eszközzel jobb.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát részben támogatta az OTKA T037706 számú projektje. A szerző köszönettel tartozik Dózsa Lászlónak a kézirat gondos átnézéséért és értékes tanácsaiért.

Irodalom

- [1] R. Cui, J. Liu, W. Ma, J. Hu, X. Zhou, H. Li, J. Hu, A needle temperature microsensor for in vivo and real-time measurement of the temperature in acupoints, *Sensors and Actuators, A* 119 (2005), pp.128–132.
- [2] B.C.S. Chou, Y.M. Chen, M.O. Yang, J.S. Shie, A sensitive Pirani vacuum sensor and the electrothermal SPICE modelling, *Sensors and Actuators A* 53 (1996), pp.273–277.
- [3] T.M. Berlicki, Thermal vacuum sensor with compensation of heat transfer, *Sensors and Actuators A* 93 (2001), pp.27–32.
- [4] W.J. Alvesteffer, D.C. Jacobs, D.H. Baker, Miniaturized thin-film thermal vacuum sensor, *Journal of Vacuum Science and Techn. A* 13 (1995), pp.2980–2985.
- [5] E.H. Klaassen, G.T.A. Kovacs, Integrated thermal-conductivity vacuum sensor, *Sensors and Actuators A* 58 (1997), pp.37–42.

- [6] H.Jing-Bao, T. Qin-Yi,
Integrated multi-function sensor for flow velocity,
temperature and vacuum measurements,
Sensors and Actuators A 19 (1989), pp.3–11.
- [7] N. Sabaté, J. Santander, L. Fonseca,
I. Grácia, C. Cané,
Multi-range silicon micromachined flow sensor,
Sensors and Actuators A 110 (2004), pp.282–288.
- [8] P. Fürjes, G. Légrádi, Cs. Dücső,
A. Aszódi, I. Bársony,
Thermal characterisation of a direction dependent
flow sensor,
Sensors and Actuators A 115 (2004), pp.417–423.
- [9] Á. Cuadras, O. Casas,
Determination of heart rate using a high-resolution
temperature measurement,
IEEE Sensors Journal 6 (2006), pp.836–843.
- [10] P. Fürjes, Zs. Vizváry, M. Ádám, A. Morissey,
Cs. Dücső, I. Bársony,
Thermal investigations of micro-filament heaters,
Sensors and Actuators A 99 (2002), pp.98–103.
- [11] M. Barocini, P. Placidi, G.C. Cardinali, A. Scorzoni,
Thermal characterization of a microheater for
micromachined gas sensor,
Sensors and Actuators A 115 (2004), pp.8–14.
- [12] I. Bársony, P. Fürjes, M. Ádám, Cs. Dücső,
Zs. Vízváry, J. Zettner, F. Stam,
Thermal response of microfilament heaters
in gas sensing,
Sensors and Actuators B 103 (2004), pp.442–447.
- [13] I.A. Khrebtov,
Noise properties of high temperature
superconducting bolometers,
Fluctuation and Noise Letters 2 (2002), pp.R51–R70.
- [14] A. Yildiz, Z. Çelik-Butler, D.P. Butler,
Microbolometers on a flexible substrate
for infrared detection,
IEEE Sensor Journal 4 (2004), pp.112–117.
- [15] M. Almars, B. Xu, J. Castrance,
Amorphous silicon two-color microbolometer
for uncooled IR detection,
IEEE Sensors Journal 6 (2006), pp.293–300.
- [16] DIN 43 760: 1968
British Standard 1904: 1964-Section 3.15.
- [17] M. Ádám, T. Mohácsy, P. Jónás, Cs. Dücső,
É. Vázsonyi, I. Bársony,
CMOS integrated tactile sensor array by
porous Si bulk micromachining,
Sensors and Actuators A: Physical, 9 (2007).
- [18] Béla Szentpáli,
Noise limitations of the applications of miniature
thermal resistors,
IEEE Sensors Journal 9 (2007), pp.1293–1299.
- [19] H.A. Watson,
Microwave semiconductor devices and
their circuit applications,
McGraw-Hill, New York 1969., pp.379–381.
- [20] Sh. Kogan,
Electronic noise and fluctuations in solids,
Cambridge University Press 1996., Chapter 2.
- [21] F.N. Hooge, T.G.M. Kleinpenning, L.K.J. Vandamme,
Experimental studies on $1/f$ noise,
Rep. on Progress in Physics 44 (1981), pp.479–532.
- [22] F.N. Hooge,
 $1/f$ noise is no surface effect,
Physics Letters 29 A (1969), pp.139–140.
- [23] Sh. Kogan,
Electronic noise and fluctuations in solids,
Cambridge University Press 1996., Chapter 8.2.6.
- [24] A.L. McWhorter,
In: R.H.Kingston (ed.), *Semiconductor Surface Physics*
University Pennsylvania Press, Philadelphia, 1957.
- [25] B.K. Jones,
Low-frequency noise spectroscopy,
IEEE Transactions on Electron Devices 41 (1994),
pp.2188–2197.
- [26] F.N. Hooge,
On the additivity of generation-recombination spectra,
Part 1: Conduction band with two centres,
Physica B 311 (2002), pp.238–249.
- [27] F.N. Hooge,
On the additivity of generation-recombination spectra,
Part 2: $1/f$ noise,
Physica B 336 (2003), pp.236–251.
- [28] D.M. Fleetwood, N. Giordano,
Resistivity dependence of $1/f$ noise in metal films,
Physical Review B 27 (1983), pp.667–671.
- [29] Ádám Mária, szóbeli közlés
- [30] K.S. Rawat, G.H. Massiha,
Low frequency noise measurement-based reliability
testing of VLSI interconnects with different geometry,
IEEE Electr. Dev. Letters 25 (2004), pp.781–783.
- [31] T.M. Chen, A.M. Yassine,
Electrical noise and VLSI interconnect reliability,
IEEE Transactions on Electron Devices 41 (1994),
pp.2165–2172.
- [32] Z. Çelik-Butler, W. Yang, H.H. Hoang, W.R. Hunter,
Characterization of electromigration parameters
in VLSI metallizations by $1/f$ noise measurement,
Solid-State Electronics 34 (1991), pp.185–188.
- [33] B. Szentpáli, M. Ádám, T. Mohácsy,
Noise in piezoresistive Si pressure sensors,
Proc. of the SPIE, Vol. 5846 (2005), Austin, Texas,
May 24–27, pp.169–179.
- [34] É. Vázsonyi, M. Ádám, Cs. Dücső, Z. Vízváry,
A.L. Tóth, I. Bársony,
Three-dimensional force sensor by novel alkaline
etching technique,
Sensors and Actuators A 123–124 (2005),
pp.620–626.

Nem-illékony nanokristályos félvezető memóriák

BASA PÉTER, HORVÁTH ZSOLT JÓZSEF, JÁSZI TAMÁS, MOLNÁR GYÖRGY,
PAP ANDREA EDIT, DOBOS LÁSZLÓ, TÓTH LAJOS, PÉCZ BÉLA

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet,
basa@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: nanokristály, memória, memóriatranzisztor, szilícium, germánium, szilícium-nitrid

A cikk röviden tárgyalja a nem-illékony memóriaelemek működési elvét, a méretcsökkentéssel kapcsolatos technológiai problémákat, és azok lehetséges megoldását nanokristályos szerkezetek segítségével. Ismerteti a nanokristályos memóriák előállítási módszereit és az eddigi legjobb publikált eredményeket. Összefoglalja a Si és Ge nanokristályokat tartalmazó MNOS szerkezeteken a szerzők által kapott eredményeket, melyek szerint a megfelelő méretű nanokristályok jelenléte az MNOS memóriaszerkezetek töltésbeviteli és töltéstárolási tulajdonságait is javítja.

1. Bevezetés

A hagyományos félvezető-alapú „nem-illékony” (non-volatile) elektromosan törölhető programozható csak olvasó memóriák (EEPROM-ok) információátvitelére a fém/szigetelő/félvezető (MIS) térvezérlésű memóriatranzisztor küszöb feszültségének nagy amplitúdójú „beíró” vagy „törölő” feszültségimpulzusokkal való megváltoztatásán alapszik.

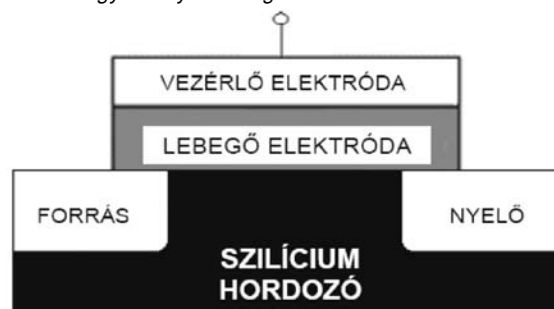
A küszöb feszültség változása a vezérlőelektróda (gate) alatti szigetelőrétegben az impulzus ideje alatt injektált és ott befogott elektromos töltés következménye. A beírás és törlés során a töltéshordozók a szilícium hordozó felől alagút effektussal jutnak be a szigetelő rétegbe és vagy egy lebegő elektródán (floating gate) (1. ábra), vagy a szigetelő rétegben lévő csapdákban tárolódnak. Ez utóbbira jellemző példák a fém/szilícium-nitrid/szilícium-dioxid/szilícium (MNOS) (2. ábra) és a polikristályos szilícium/szilícium-dioxid/szilícium-nitrid/szilícium-dioxid/szilícium (SONOS) szerkezetek, melyekben az injektált töltés a szilícium-nitrid rétegben lévő csapdákba fogódik be és ott tárolódik [1].

Napjaink „flash” memóriáiban elsősorban lebegő elektródás eszközöket használnak, ahol a lebegő gate két szilícium-dioxid réteg közé van beágyazva (1. ábra). Ilyen memóriák találhatók a „pendrive”-okban, memóriakártyákban, MP3 lejátszóknak, PDA-kban vagy mobiltelefonokban is. A nem-illékony elnevezés arra utal, hogy az eszköz az információt tápfeszültség biztosítása nélkül tárolja, maga a flash szó pedig arra, hogy működés közben a memóriacellák nagy száma törölhető egyszerre.

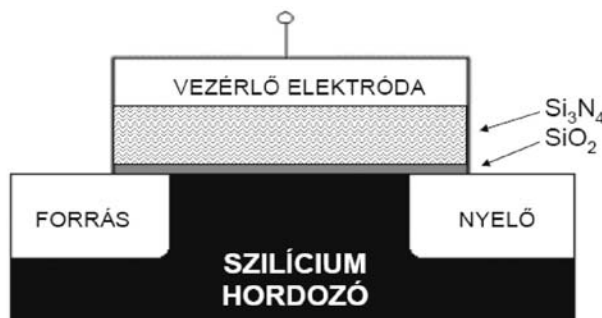
A 2006-os International Technology Roadmap for Semiconductors szerint az egy bit tárolásához szükséges hagyományos NOR memóriacella mérete 2013-ban a 2005-ös 0,064 μm^2 -nek már csak a közel egyharmada lesz, míg a lebegő elektróda alatti, úgynevezett tunnel oxid vastagsága változatlan marad, 8 nm körüli értéken stagnál. Ez azt jelenti, hogy az eszköz méretét egyre inkább a nagy beíró/törölő feszültségek kapcsolásához szükséges viszonylag nagyméretű áramkörök

fogják meghatározni. Ha a tunnel oxidréteget vékonyíthatnánk, akkor egyrészt a beíró/törölő feszültség lenne csökkenthető, másrészt gyorsabb beírás/törölés lenne elérhető.

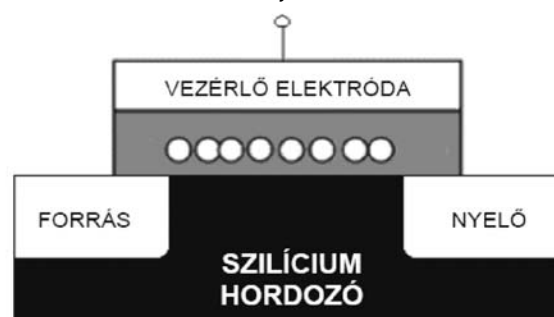
1. ábra Hagományos lebegő elektródás memóriatranzisztor



2. ábra Az MNOS memóriatranzisztor



3. ábra A nanokristályos memóriatranzisztor



Azonban a Moore-törvénynek megfelelő rohamos méretcsökkenéssel összefüggésben az egyre vékonyabb, tunnel réteggént használt SiO_2 réteget egyre nehezebb hibamentesen, jó minőségben előállítani. Ennek következtében megnő a rétegben jelenlévő hibahelyek jelentősége. Hagyományos lebegő gate-es memóriatranzisztor esetében az esetleges hibahelyeken keresztül a lebegő gate-en tárolt töltés könnyen elszivároghat.

A lebegő gate-es memóriatranzisztorok kiváltására a közeljövőben két ígéretes módszer ajánlkozik. Az első magának a lebegő gate-nek a kiváltása: ekkor félvezető nanokristályokat használva (a sematikus elrendezés a 3. ábrán látható) a töltés egymástól szigetelő réteggel elválasztott szemcsékben, a nanokristályokban tárolódik, így a hibahelyek csak a közvetlen környezetükben elhelyezkedő nanokristályoknál okoznak töltésszivárgást – a többi szemcsé megőrzi az információt [1]. A második egy új szemléletű eszköz bevezetése, ahol egy csatornaréteg fázisállapotát kapcsolgatjuk feszültségimpulzusokkal a nanokristályos és az amorf állapot között, melyek nagy és kis vezetőképességű állapotokat jelentenek. Ez utóbbi eszköz neve a szakirodalomban „phase-change memory”, magyarul fázisállapot-váltó memória [2].

Jelen dolgozatban röviden ismertetjük a félvezető nanokristályokat tartalmazó MIS struktúrák előállítási módszereit és nem illékony memória célú felhasználásukat, kitérve saját fontosabb Si és Ge nanokristályokat tartalmazó MNOS szerkezeteken kapott eredményeinkre is.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Mintakészítési módszerek

A legáltalánosabb struktúra a fém (vagy polikristályos Si)/ SiO_x /Si szerkezet, ahol a Si nanokristályok a SiO_x rétegbe vannak beágyazva. Szigetelő réteggént a szilícium oxidok helyett Al_2O_3 , vagy többrétegű dielektrikum is használható. A Si-on kívül gyakran használnak még Ge, vagy SiGe nanokristályokat is.

Négy fő előállítási módszer létezik. A leggyakrabban használt módszer az ionsugaras szintézis, melynek során Si-ot vagy Ge-ot implantálnak a SiO_x rétegbe. A műveletet nagyhőmérsékletű hőkezelés (vagy oxidáció) követi, melynek során végbemegy a nanokristályok kialakulása [1]. Egy másik módszer, amikor többrétegű struktúrát hoznak létre: egy vékony amorf vagy polikristályos Si vagy Ge réteget választanak le SiO_2 , vagy Si_3N_4 rétegre. Ezután a Si vagy Ge réteget egy másik dielektrikummal borítják, vagy a Si szemcséket magukat oxidálják. A nanokristályok itt is hőkezelés hatására jönnek létre, ami vagy a párologtatás közben történik, vagy a közepső Si vagy Ge réteg leválasztása után, vagy pedig a második dielektrikum réteg leválasztását követően [1,3]. A harmadik módszer szerint egy Si-ban vagy Ge-ban gazdag SiO_x vagy SiN_x réteget választanak le, a nanokristályok képződése pedig a rétegen belül, utólagos nagyhőmérsékletű hőkezelés hatására következik be [1]. A negyedik, legújabb módszer során magu-

kat a Si nanokristályokat, vagy egy Si nanokristályokat tartalmazó SiN_x réteget választanak le különböző kémiai gőzfázisú leválasztási (CVD) módszerekkel [4-6]. Itt a nanokristályok a leválasztás közben alakulnak ki, a módszer nem igényel utólagos hőkezelést.

2.2. Alkalmazás nem-illékony memóriaeszközökben

Mint a bevezetésben említettük, az információtárolás a flash memóriákban térvezérlésű tranzisztorok (FET-ek) küszöbfeszültségének megfelelő feszültségimpulzusokkal történő megváltoztatásán alapszik.

A memóriatranzisztorok legfontosabb jellemzői:

- a beíró/törölő feszültségimpulzusok amplitúdója és időbeli szélessége,
- a memóriaablak szélessége (a „beírt” és „törölt” állapotokat jelentő küszöbfeszültségek közötti feszültségkülönbség),
- a tartósság (endurancia), mely megmutatja, hány beíró/törölő ciklust visel el a tranzisztor degradáció nélkül), és
- a retenció (a küszöbfeszültség változásának sebessége a töltésszivárgás következtében).

Az eszközökkel szemben követelmény, hogy minél kisebb feszültségekkel tudjunk minél gyorsabban írni/törölni. Kisebb és rövidebb feszültségimpulzusok hatására ugyanakkor kisebb memória ablak szélességet és gyakran rosszabb retenciós tulajdonságot kapunk. Jelenleg a flash memóriákban egy tranzisztor szükséges egy bit tárolásához, ami a legnagyobb eszközsűrűséget teszi lehetővé mind az illékony (SRAM, DRAM), mind a nem-illékony memóriák (ROM, EPROM, EEPROM) között [1].

Ígéretesek a kisenergiájú ionsugaras szintézissel előállított Si nanokristályos memória eszközökkel kapcsolatban újabban publikált eredmények [1,7-8]. Ennél a módszernél 0.5-2 keV közötti energiákat használnak az ionimplantáció során, amit nagyhőmérsékletű hőkezelés követ. Az így előállított eszközök viselkedése ugyanakkor nem csak az implantációs energiától és dózistól, valamint a hőkezelési paraméterektől függ, hanem a minta felületének az implantáció során bekövetkező szennyeződésétől és elektromos feltöltődésétől, az oxidréteg vastagságának megváltozásától, a hőkezelés előtti mintatisztítási körülményektől, vagy az iongyorsítás körülményeitől [1,7]. Az említett paramétereket optimalizálva az utóbbi időben a következő eredmények születtek: ± 9 V, 10 ms beíró/törölő feszültség hatására 2 V-os memória ablak szélességet kaptak, ami 1,5 millió beíró/törölő ciklus után sem változott, a 10 évre extrapolált memória ablak szélesség pedig 0,4 V [1,7].

Egy másik tanulmányban 1 V-os memória ablak szélességet kaptak ± 12 V, 1 μs -os beíró/törölő feszültségekkel, szintén kisenergiás ionsugaras szintézis segítségével előállított eszközökön. A 10 évre extrapolált memória ablak szélessége 0.3 V [8].

2003-ban a Freescale Semiconductor bemutatta a világ első 4 Mbit-es nanokristályos flash memória termékét, majd 2005-ben az első 24 Mbit-es elrendezést [9].

3. Nanokristályos MNOS szerkezetek kutatása

Kutatócsoportunk az MTA MFA-ban Si [6,10-11] és Ge [11] nanokristályokat tartalmazó fém/szilícium-nitrid/félvezető (MNS) [10] és MNOS [6] szerkezetek töltésbeviteli (memória ablak) és töltéstároló (retenciós) tulajdonságait vizsgálta az előállítási körülmények függvényében. Itt a legfontosabb eredményeket foglaljuk röviden össze.

3.1. Motiváció

Az MNOS szerkezetek esetében a bevitt töltés a nitridrétegben lévő csapdáknak tárolódik, melyek `a priori` el vannak szigetelve egymástól. Így egy esetleges lokális oxidhiba esetén a teljes töltés nem szivárog el, a beírt információ megmarad. A nitridréteg alkalmazásának további előnye, hogy a nitrid nagyobb dielektromos állandója miatt ugyanakkora rétegvastagságok esetében ugyanakkora amplitúdójú feszültségimpulzus hatására a tunnel oxidban erősebb elektromos tér alakul ki, ami elősegíti a töltésbevitelt.

Ugyanakkor elméleti megfontolások alapján arra számítottunk, hogy ha az oxid/nitrid határfelületre félvezető nanokristályokat építünk be, azok várhatóan javítják mind a töltésbeviteli, mind a retenciós tulajdonságokat.

3.2. Mintakészítés, vizsgálatok

A Si nanokristályos minták esetében az n-típusú szilícium hordozókra tisztítás után először egy 2,5 nm vastag kémiai oxidot növesztettünk HNO_3 oldat alkalmazásával [6,11]. Erre növesztettük alacsony nyomású kémiai gőzfázisú leválasztással (LPCVD) SiH_2Cl_2 segítségével a Si nanokristályokat [6,10-11]. Ezt egy 40 nm vastag Si_3N_4 réteggel borítottuk, melyet szintén alacsony nyomású kémiai gőzfázisú leválasztással állítottunk elő SiH_2Cl_2 és NH_3 keverékből. A középső Si nanokristály réteg leválasztási idejének a hatását vizsgáltuk [6,11].

A Ge nanokristályos minták esetében két fajta kémiai oxidot alkalmaztunk tunnel réteggént. Az egyiket a Si nanokristályos mintákhoz hasonlóan salétromsav segítségével állítottuk elő, a másikat pedig $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ segítségével. A Ge nanokristályokat elektronsugaras párologtatással növesztettük. Párologtatás közben a

hordozót 350°C -on tartottuk [3,11]. A Ge nanokristályokat 75 nm vastag LPCVD Si_3N_4 réteggel borítottuk.

A szeletek hátoldalán ohmos kontaktusokat készítettünk, az előoldalon pedig kondenzátor fegyverzeteket alakítottunk ki Al párologtatásával és fotolitográfiával. A kondenzátorok felülete $0,64 \text{ mm}^2$ volt. A memória tulajdonságokat a flat-band feszültség változásának a mérésével vizsgáltuk, ugyanis a kondenzátorok flat-band feszültsége hasonló módon változik a szigetelőben tárolt töltéssel, mint a FET-ek küszöbfeszültsége.

3.3. Eredmények

A Si nanokristályos minták memória tulajdonságait az 1. táblázat szemlélteti, mely a $\pm 20\text{V}$, 100 ms-os impulzusok hatására kapott kiindulási memóriaablak-szélességet és a retenció mérésekből 1 évre és 10 évre extrapolált memóriaablak-szélesség értékeket tartalmazza a Si nanokristály réteg leválasztási idejének a függvényében. A 0 s leválasztási idő a nanokristály nélküli referencia mintának felel meg. A táblázatból látható, hogy a 30 s leválasztási idővel készült nanokristályos minta esetében mind a töltésbeviteli, mind a töltéstárolási tulajdonságok valamivel jobbak, mint a referencia minta esetében. A 60 s-os Si nanokristály leválasztás rontott a töltéstárolási tulajdonságon. A még hosszabb leválasztási idő drasztikusan rontott a töltéstároláson [10]. Ennek valószínű oka, hogy a nanokristályok már nincsenek teljesen elszigetelve egymástól és így a töltés szétfolyik a nanokristály rétegben.

A Ge nanokristályokat tartalmazó szerkezetek hasonló paraméterei a 2. táblázatban találhatóak. Itt $\pm 25\text{V}$, 100 ms-os impulzusokat alkalmaztunk, hogy a legjobb töltésbeviteli tulajdonságot mutató szerkezet esetében (HNO_3 , 30 s) hasonló ablak-szélességet kapjunk, mint a Si nanokristályos szerkezetek esetében. (Itt vastagabb a felső nitrid réteg, ezért kell nagyobb amplitúdójú impulzust alkalmazni.)

A táblázat alapján látszik, hogy a salétromsavval növesztett oxid réteget tartalmazó minták esetében könnyebb a töltésbevitel, mint a kénsav és hidrogénperoxidos minták esetében. Az is megfigyelhető, hogy a legjobb töltésbevitelt mutató minta esetében (HNO_3 , 30 s) a retenció rosszabb, mint a többi salétromsavas mintánál. A salétromsavas 60 s-os minta viszont mind a töl-

1. táblázat

A Si nanokristályos mintákon $\pm 20\text{V}$, 100 ms-os impulzusok hatására kapott kiindulási memóriaablak-szélesség és az 1 évre és 10 évre extrapolált értékek a Si nanokristály réteg leválasztási idejének a függvényében. A zárójelben lévő számok a 10 év utáni ablak-szélességet adják meg a kiindulási érték százalékában.

Leválasztási idő [s]	Memóriaablak kezdeti szélessége [V]	Memóriaablak szélessége 1 év után [V]	Memóriaablak szélessége 10 év után [V]
0	14,0	2,09	0,85 (6,07%)
30	14,4	2,10	0,95 (6,60%)
60	14,6	1,52	0,31 (2,12%)

tésbevitel, mind a töltéstárolás szempontjából jobb, mint a referencia minta. A kénsav és hidrogénperoxid oldattal készült minták esetében mind a 30 s-os, mind a 60 s-os Ge nanokristály leválasztás javította a töltésbeviteli és töltéstárolási tulajdonságokat.

4. Összefoglalás

Röviden ismertettük a nem-illékony memóriaelemek működési elvét, a méretcsökkentéssel kapcsolatos technológiai problémákat és azok lehetséges megoldását nanokristályos szerkezetek segítségével, valamint a nanokristályos memóriák előállításának módszereit és az eddigi legjobb publikált eredményeket. Összefoglaltuk a Si és Ge nanokristályokat tartalmazó MNOS szerkezeteken kapott saját eredményeinket, melyek segítségével kimutattuk, hogy a megfelelő méretű nanokristályok jelenléte az MNOS memóriaszerkezetek töltésbeviteli és töltéstárolási tulajdonságait is javítja.

Köszönetnyilvánítás

A munkát részben az Európai Bizottság SEMINANO projektje (az NMP4-CT-2004-505285 számú szerződésen keresztül), részben pedig az OTKA T048696 számú programja támogatta.

Irodalom

- [1] Zs. J. Horváth, Current Appl. Phys. 6 (2006), p.145. és a benne szereplő hivatkozások.
- [2] S. Hosaka, K. Miyauchi, T. Tamura, H. Sone, H. Koyanagi, Microel. Eng. 73-74 (2004), p.736.
- [3] P. Basa, G. Molnár, L. Dobos, B. Pécz, L. Tóth, A.L. Tóth, A.A. Koós, L. Dózsa, Á. Nemcsics, Zs.J. Horváth, J. Nanosci. Nanotechnol. – megjelenés alatt.

- [4] R.A. Rao, R.F. Steimle, M. Sadd, C.T. Swift, B. Hradsky, S. Straub, T. Merchant, M. Stoker, S.G.H. Anderson, M. Rossow, J. Yater, B. Acred, K. Harber, E.J. Prinz, B.E. White Jr., R. Muralidhar, Solid-State Electron. 48 (2004), p.1463.
- [5] K.S. Cho, N.-M. Park, T.-Y. Kim, K.-H. Kim, G.Y. Sung, J.H. Shin, Appl. Phys. Lett. 86, 071909 (2005).
- [6] Zs.J. Horváth, P. Basa, T. Jászi, A.E. Pap, L. Dobos, B. Pécz, L. Tóth, P. Szöllősi, K. Nagy, J. Nanosci. Nanotechnol. – megjelenés alatt.
- [7] P. Normand, P. Dimitrakis, E. Kapetanakis, D. Skarlatos, K. Beltsios, D. Tsoukalas, C. Bonafos, H. Coffin, G. Benassayag, A. Claverie, V. Soncini, A. Agarwal, Ch. Sohl, M. Ameen, Microel. Eng. 73-74 (2004), p.730. és a benne szereplő hivatkozások.
- [8] C.Y. Ng, T.P. Chen, D. Sreeduth, Q. Chen, L. Ding, A. Du, Thin Solid Films 25 (2006), pp.504.
- [9] E. Prinz, 43rd Design Automation Conference 2006, San Diego, California, <http://www.dac.com/44th/44talkindex.html>
- [10] P. Basa, Zs.J. Horváth, T. Jászi, A.E. Pap, L. Dobos, B. Pécz, L. Tóth, P. Szöllősi, Physica E 38 (2007), p.71.
- [11] Zs.J. Horváth, T. Jászi, A.E. Pap, G. Molnár, Cs. Dücső, P. Basa, K. Nagy, L. Dobos, B. Pécz, L. Tóth, P. Szöllősi, T. Szabó, Appl. Surf. Sci., beküldve.

2. táblázat

A Ge nanokristályos mintákon $\pm 25V$, 100 ms-os impulzusok hatására kapott kiindulási memóriaablak-szélesség és az 1 és 10 évre extrapolált értékek az oxidnövesztés és a Ge nanokristály réteg leválasztási idejének a függvényében

Oxidnövesztés	Leválasztási idő [s]	Memóriaablak kezdeti szélessége [V]	Memóriaablak szélessége 1 év után [V]	Memóriaablak szélessége 10 év után [V]
HNO₃	0	10,9	1,18	0,13
	30	14,5	0,96	0
	60	11,8	1,43	0,33
H₂SO₄ + H₂O₂	0	10,5	0,92	0
	30	11,2	1,17	0,07
	60	11,1	1,2	0,14

Tapintásérzékelő tömbök – tervezés és jelfeldolgozás

VÁSÁRHELYI GÁBOR, ÁDÁM ANTALNÉ, DÜCSŐ CSABA, BÁRSONY ISTVÁN

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
{vasarhelyi, adam, ducso, barsony}@mfa.kfki.hu

KIS ATTILA

Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológiai Kar
kis@itk.ppk.hu

Lektorált

Kulcsszavak: tapintásérzékelő, rugalmas borítás, taxel, MEMS, három erőkomponens

Tapintásérzékelő rendszereket előszeretettel használnak az iparban, orvostudományban, virtuális valóság alapú alkalmazásokban, azonban a legtöbb rendszer csak egy egyszerű nyomástérkép felvételére alkalmas. Ebben a cikkben egy olyan – világviszonylatban újdonságnak számító – tapintásérzékelő tömböt mutatunk be, melynek minden egyes tapintó eleme (taxel, tactile pixel) a felületére ható erők mindhárom (egy a felületre merőleges és két nyíróirányú) komponensét érzékelni tudja. Bemutatjuk az integrált mikroérzékelők előállításának folyamatát, az érzékelőket borító rugalmas bevonat információ kódoló hatását és végül egy robotikai példaalkalmazást is, ahol a három erőkomponens mérésének kiemelkedő szerepe van.

1. Bevezetés

A tapintás az emberi testnek a látás után talán legfontosabb, legkomplexebb információt közvetítő érzékelési módja. Az emberi bőr temérdek apró receptort tartalmaz, amik a tapintási információ egyes komponenseit (statikus nyomás, elmozdulás, vibráció stb.) párhuzamos csatornákon közvetítik a jelfeldolgozó központ, az agy felé. Célunk ennek az érzékelő és jelfeldolgozó rendszernek a lemásolása olyan mesterséges tapintásérzékelő rendszerekkel, melyek robotkezekbe, orvosi diagnosztikai eszközökbe vagy akár művégtagokba integrálva segítik ezek működését.

Érzékelő rendszereink alapját a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetben (MTA MFA) fejlesztett tapintásérzékelő tömbök képezik. Ezek az apró MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) eszközök a szilícium egykristály tömbi mikromechanikai megmunkálásával készül, olyan érzékelő-jelfeldolgozó rendszerek, melyek a hagyományos nyomásérzékelőkkel ellentétben a felületükön támadó erő-vektornak nem csak a felületre merőleges, hanem az azzal párhuzamos, nyíróirányú komponenseit is képesek mérni, feldolgozni és továbbítani.

A tapintásérzékelők nélkülözhetetlen és meghatározó kelléke a rugalmas borítás, mely amellett, hogy bizonyos fokú fizikai védelmet biztosít a sérülékeny taxelnek, mechanikai tulajdonságainál fogva alapvetően befolyásolja az érzékelési folyamatot. Gondoljunk csak a nyáron talpunkon kialakuló bőrkeményedés hatására, vagy ennek ellenkezőjére, a lehorzsolts bőrfelületünkön tapasztalható megnövekedett érzékenységre. A rugalmas borítás tulajdonképpen a tapintási folyamat első *téridőbeli dinamikus jelfeldolgozó rétegének* tekinthető, hatását tehát mindenképpen figyelembe kell vennünk az érzékelő tömbjeink tervezésénél.

A következőkben ismertetjük a tapintásérzékelő tömbök előállítási folyamatát, majd bemutatjuk a bőrszerű

rugalmas borítás információ-kódoló hatását. Tesszük ezt azzal a céllal, hogy egyrészt jobban megértsük az emberi tapintásérzékelés működését, másrészt hogy a biológiai rendszerekből ötleteket merítve tökéletesíthessük mesterséges érzékelőink hatékonyságát. Az általános ismertetést egy tapintásérzékelőkkel felszerelt robotkar *proaktív megfogási feladatának* bemutatásával zárjuk.

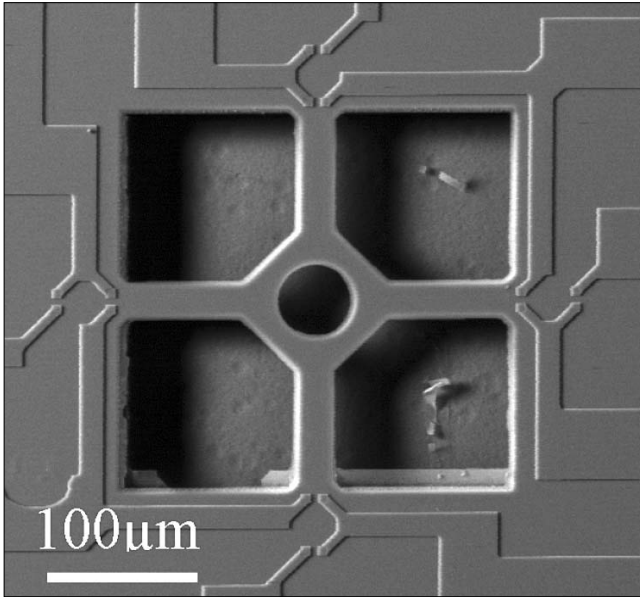
Ez a cikk tulajdonképpen magyar nyelvű összefoglalója a témában megjelent és a hivatkozásjegyzékben felsorolt korábbi nemzetközi publikációinknak [1-7].

2. MEMS érzékelők

A tapintásérzékelő tömbök egykristályos szilíciumból készülnek az IC gyártástechnológia jól ismert technikáival, amelyet kiegészítünk a Si egykristály három dimenziós tömbi mikromechanikai megmunkálásával. A szilíciumnak egyrészt rendkívül jó mechanikai tulajdonságai vannak, másrészt a rá épülő technológia kombinálható a hagyományos mikrotechnológiai lépésekkel is. Ez lehetővé teszi egyetlen chipen integrált intelligens érzékelőrendszerek (úgynevezett smart sensors) létrehozását.

Az érzékelő tömbök minden egyes taxel-eleme egy apró, felfüggesztett, perforált egykristályos Si membrán vagy hídpár (1. ábra). A felfüggesztési pontokban gondosan pozicionált beágyazott piezoellenállások találhatók, amik a terhelés hatására az egyes hídelemekben ébredő mechanikai feszültséggel arányosan változtatják értéküket.

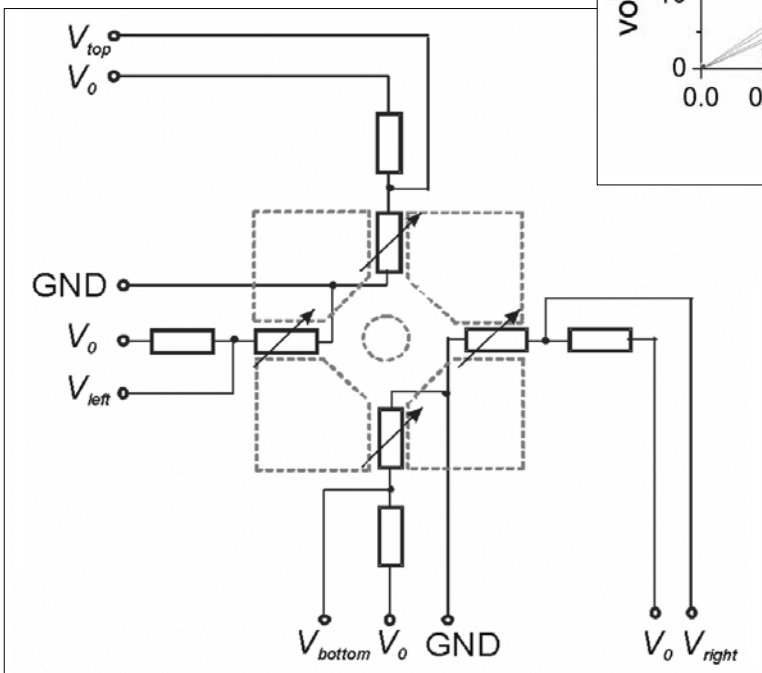
Az érzékelők egyoldali pórusos szilícium megmunkálással készülnek, a hidakat n-típusú egykristályos szilícium alkotja, amelyekben ionimplantációval p+ adalékolással piezoellenállásokat alakítunk ki. A piezoellenállások helyét és irányultságát végeelem szimulációs számítások alapján azokba a pontokba helyeztük, ahol az ébredő mechanikai feszültségek maximális értékűek.



1. ábra

Egy piezorezisztív érzékelő elem pásztázó elektron-mikroszkópos képe. Karakterisztikus méretek: híd $80 \times 32 \times 10 \mu\text{m}^3$, középső merevítő $100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}^3$, lyukátmérő $50 \mu\text{m}$, marási mélység kb. $35 \mu\text{m}$. A piezoellenállás-párok (mérő- és terhelésmentes referenciaellenállás) a hidak felfüggesztési pontjai körül találhatók.

Minden piezoellenálláshoz tartozik egy, a nem deformálódó Si tömbben kialakított, sorosan kapcsolt referencia elem, aminek értéke terhelés alatt sem változik. A két ellenállást feszültség osztóként, vagy fél Wheatstone-hídba kapcsolva a mechanikai feszültséggel arányos analóg ellenállás változást egyenárrammal mérhetjük (2. ábra). Egy-egy érzékelő elemhez a geometriai kialakításnak megfelelően négy piezoellenállás tartozik, ami egyben az érzékelőt érő erő három komponensének egymástól független mérését teszi lehetővé.

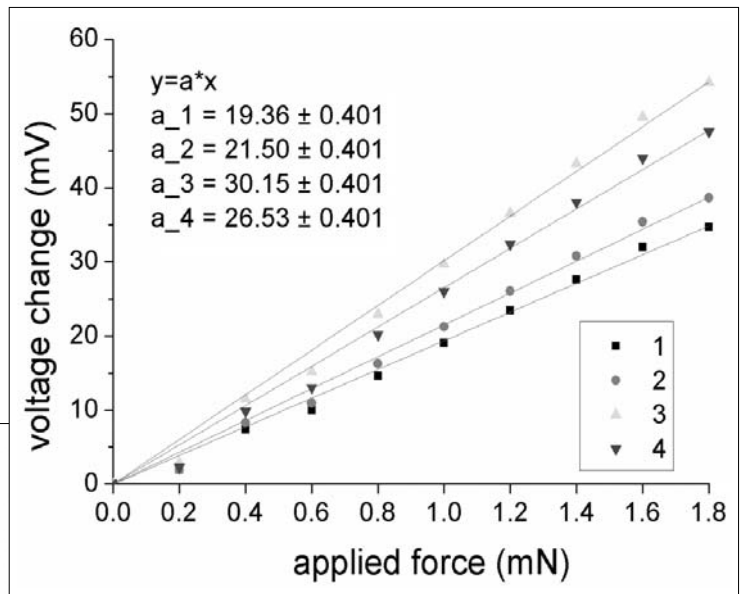


Az érzékelőt a középpontjában érő erőhatás és a mért feszültségváltozások közti lineáris kapcsolatot az alábbi képlettel írhatjuk le:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} (\Delta V_{right} - \Delta V_{left}), \\ F_y &= \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} (\Delta V_{top} - \Delta V_{bottom}), \\ F_z &= \frac{1}{V_0 \alpha_{ln} \pi_{44}} \frac{(\Delta V_{left} + \Delta V_{right} + \Delta V_{top} + \Delta V_{bottom})}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

ahol F_i az ébredő erő három komponense (z az érzékelő felületre merőleges, x és y azzal párhuzamos koordináta) V_0 a közös feszültség, ΔV a mért feszültségváltozás, π_{44} a piezorezisztivitást jellemző anyagi együttható az adott geometrikus rendszerben, α_{ln} és α_{ls} pedig a merőleges (normal) és nyíróirányú (shear) lineáris együtthatók, amelyek az adott kialakításra jellemzők.

Az érzékelők mért jelleggörbéi összhangban állnak az előzetes végelem szimulációkkal számított érzékenységgel (4-6 mV/mN/V) és az elmélet által megjósolt lineáris erőfüggést mutatják (3. ábra).



3. ábra
Az érzékelők merőleges irányú terhelésre adott lineáris válasza

2. ábra
Egy érzékelő elem négy piezoellenállása és a referencia elemek áramköri elhelyezkedése

3. Érzékelő tömbök

A gyakorlati alkalmazások sokszor megkövetelik, hogy ne egy, hanem sok érzékelő elemünk legyen egy felületen egymás mellett elhelyezve. Ez az igény 2x2-es méretű tömbök esetén (4. ábra) egyszerűen teljesíthető.

Amikor azonban növelni akarjuk az integrált taxelek számát, szembesülünk a sok kontaktushoz tartozó vezetékvezetés elhelyezésének problémájával.

Megoldásként az érzékelő chip mikro-mechanikai megmunkálási technológiáját kombináltuk a hagyományos CMOS áramköri technológia lépéseivel azért, hogy az egyes elemeket lokális áramgenerátorokkal lássuk el és a jeleket multiplexelve, azaz egy dekóder segítségével soros módon tudjuk kiolvasni. Szabadalmaztatott eljárásunkkal az egy tömbben elhelyezkedő taxelek számát az első prototípusban 8x8-ra tudtuk növelni (5. ábra).

4. A rugalmas borítás hatása

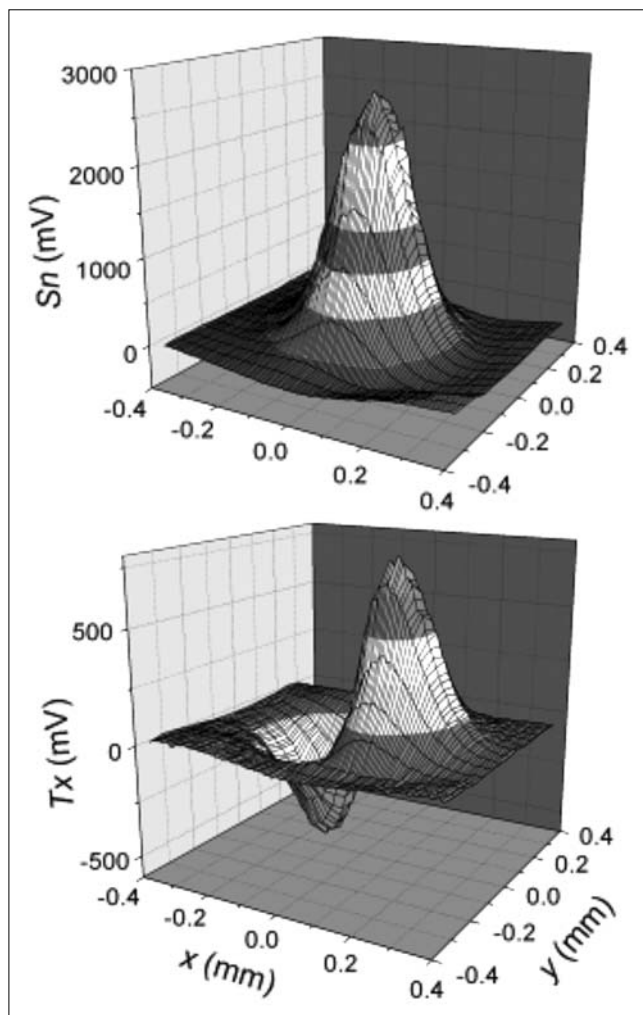
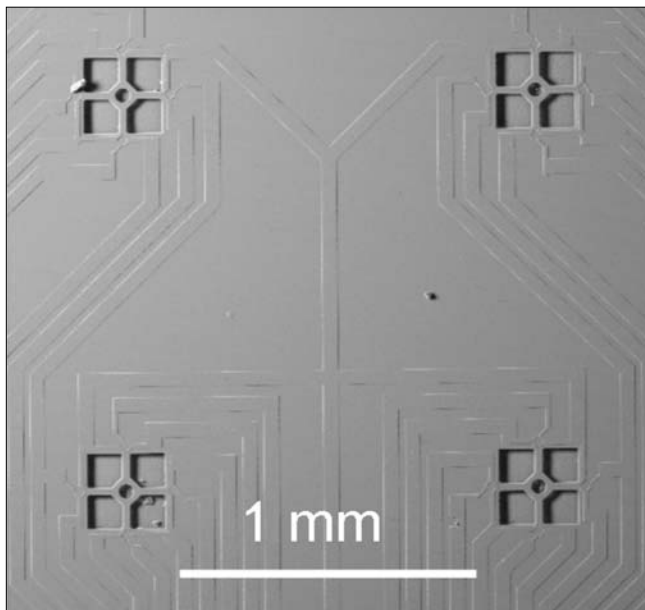
Ahogy a bevezetőben is említettük, a rugalmas borítás nélkülözhetetlen és meghatározó kelléke minden tapintórendszernek. Bőr, illetve rugalmas borítás jelenlétében a felületi erőhatások rendkívül bonyolult módon kódolva, a rugalmas anyag belsejében ébredő mechanikai feszültségek formájában jutnak el az érzékelőkhöz, legyenek azok akár az ujjainkban található mechanoreceptorok, akár a mesterséges tapintásérzékelők.

Ennek az információ kódoló rétegnek a matematikai leírását a *kontinuummechanikából* származtatjuk. A borítás anyaga első közelítésben homogén, izotróp, végtelen féltérnek fogható fel, mely alapvetően a Hooke-törvény szerint viselkedik. A félterünk egyetlen szabad felületét érő erőhatások deformálják az anyagot és benne bonyolult mechanikai feszültségeloszlást eredményeznek.

4. ábra

2x2-es érzékelő tömb

(taxel-méret: 0.3x0.3 mm; taxelek távolsága: 1.5 mm)



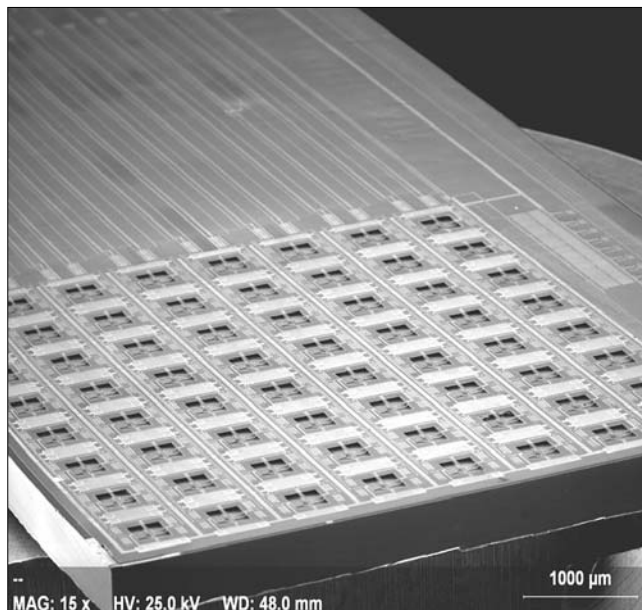
6. ábra

A legegyszerűbb, a felületre merőleges, pontszerű terhelés által keltett rendkívül bonyolult feszültségeloszlás két komponense a borítás mélyén.

A mérések szoros korrelációban vannak az elmélettel.

5. ábra

CMOS-kompatibilis MEMS technológiájával megvalósított 8x8-as érzékelő tömb (MFA szabadalom)



Mivel a feszültségek az anyagban általában az erőhatás közelében koncentrálnak és attól távolodva gyorsan elenyésznek, jó közelítésnek tekinthető, ha a végtelen anyagban a tapintásérzékelő pozícióját a véges borítás vastagságának megfelelő mélységben képzeljük el.

Az első feladat tehát az egyensúlyi egyenletek megoldásával meghatározni az adott erőeloszlás függvényében adott mélységben ébredő feszültséget vagy alakváltozást (6. ábra). Gyakorlati szempontból sokkal fontosabb az inverz probléma megoldása, vagyis a felületi erőeloszlás kiszámítása a véges számú pontban mért feszültségből.

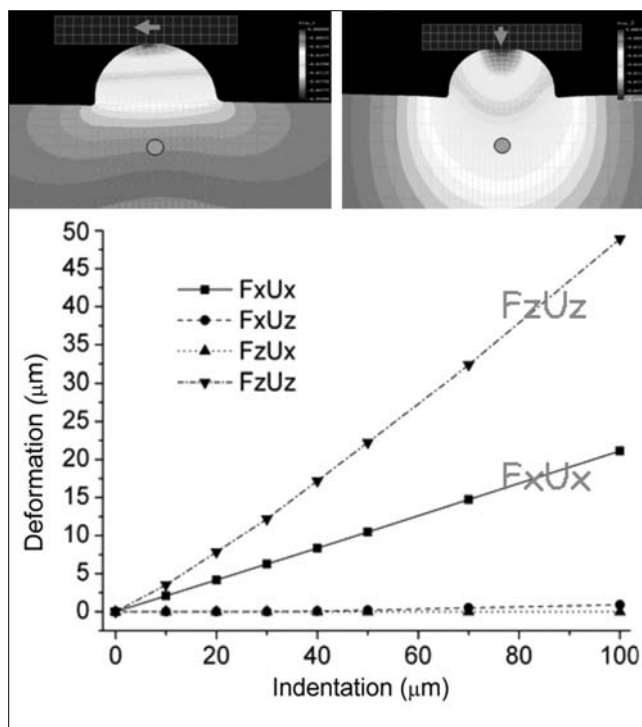
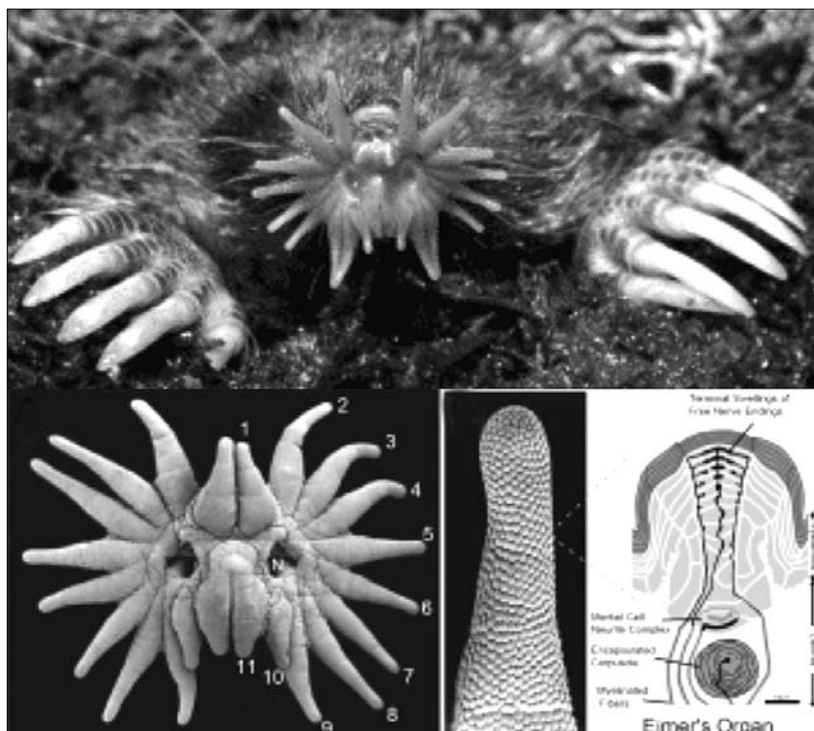
A direkt probléma első megoldásait a 19. század vége felé már megtalálták, bár az elaszticitás elméletének ekkor még semmi köze sem volt a tapintóeszközök-höz. A modell a múlt század nyolcvanas éveinek közepétől kezdve vált a bőr, illetve a mesterséges nyomásérzékelők borításának elsődleges leírási módjává.

A három szabadsági fokú érzékelők megjelenésével az elmélet újabb bővítési lehetőségek elébe nézett. Kutatásaink egyik eredménye, hogy a végtelen féltér sík felületét – az ujjainkon található ujjlenyomatok illetve a biológiai rendszerekben található legfejlettebb tapintórendszerek (7. ábra) mintájára – más geometriával váltottuk fel.

Az anyagra így azonban már nem alkalmazható az eredeti leírás, ezért az új borításban ébredő mechanikai feszültség leírásához újabb *végeselem modellt* is készítettünk. Ez a végtelen féltér modell egyfajta kibővítésének is tekinthető.

7. ábra

A csillagorrú vakond (*Condylura cristata*) tapintórendszere, mely az ujjlenyomatoknál fejlettebb rugalmas félgömböket alkalmaz a tapintási információ mechanikus elven történő szűrésére és erősítésére



8. ábra

Fent: a rugalmas félgömbök végeselem modellje a kialakuló feszültségállapotokkal különböző irányú terhelés alatt.

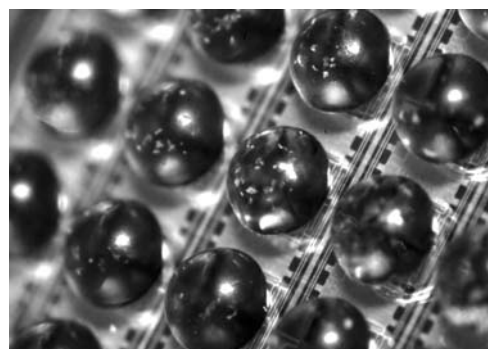
Lent: az érzékelők helyén ébredő feszültség-komponensek egymástól független és a terheléssel lineáris kapcsolata.

A csillagorrú vakondról mintázott neuromorf borításunk tulajdonképpen egy a síkfelületből kiemelkedő rugalmas félgömb, melynek számos előnyös tulajdonságára fény derült:

- A félgömb szerkezeténél fogva a térben folytonos bemeneti erőeloszlást lokalizálja és diszkrétizálja a félgömbök csúcsára és egyben ide összpontosítja az erőhatást.
- A félgömb struktúra úgy módosítja a rugalmas anyag kódolási mechanizmusát, hogy az alatta megfelelő módon elhelyezett érzékelők a felületi erőhatások mindhárom komponensét egymástól függetlenül, lineáris kapcsolattal tudják mérni (8. ábra).

9. ábra

A 8x8-as chip a félgömbös borítással



Érzékelő tömbjeinket a végeelem szimulációk alapján tervezett borítással ellátva (9. ábra) rendszerünk nyíróirányú erőkre mutatott érzékenységét is javítani tudtuk. A geometriai struktúra biológiai rendszerekben betöltött szerepével kapcsolatos feltételezéseinket is alá tudtuk támasztani.

5. Rendszerszintű integrálás

Az érzékelők jeleit egy kiolvasó egység továbbítja a számítógép felé. A kiolvasó áramkör szűri és erősíti az analóg jeleket, kompenzálja az esetleges alapállapotú feszültségek közti eltéréseket, és soros vagy USB porton keresztül éri el a PC-t.

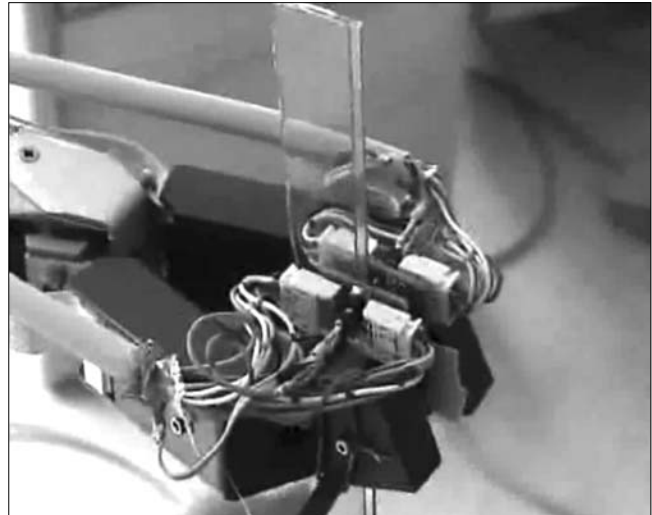
A PC-n egy Windows XP operációs rendszerre fejlesztett speciális adatfeldolgozó és megjelenítő szoftver (10. ábra) fogadja, tárolja és elemzi az adatokat akár valós időben, akár utólag visszajátzsza.

6. Proaktív robotkar vezérlés, csúszás megelőzés

A robotkaros megfogási feladat egyszerű példa a háromkomponensű tapintásérzékelő tömbök alkalmazására.

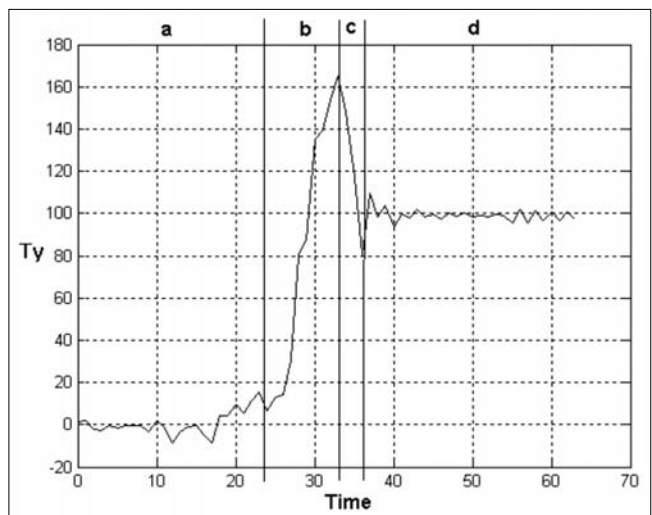
Az általunk használt robotkar végén található két ujj a kis-, és közepes méretű objektumok megfogására és tartására alkalmas (11. ábra).

Törékeny, ismeretlen tulajdonságú objektumok, mint például csúszós, vékonyfalú üvegpohár csúszásmentes megtartásához elengedhetetlen a tapintásból nyert folyamatos információ ismerete. Amikor például egy kétujjú robotkar üres poharat tart, amelybe folyamatosan folyadékot töltünk, tömege állandóan változik. Ebben az esetben a tárgy súlyának növekedésével arányosan, automatikusan növelni kell a szorítóerőt is.



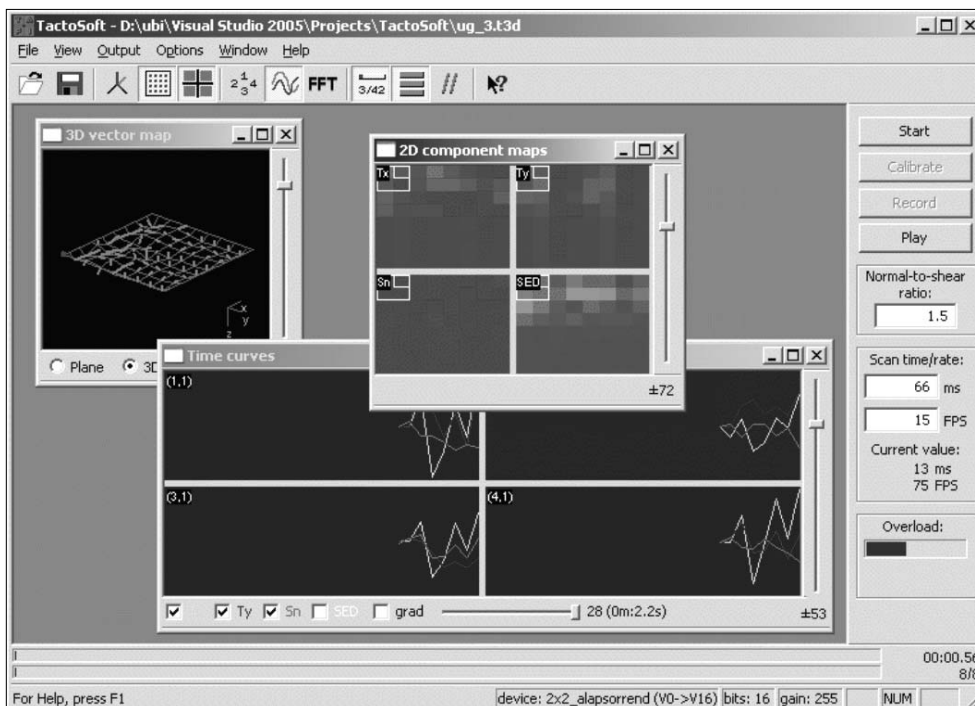
11. ábra

Katana robotkéz tart egy tárgyat a két ujjára felszerelt tapintásérzékelő tömb között



12. ábra

A megfogás időbeli folyamata a tapintásérzékelők jelein keresztül:
a) semmi sincs megfogva;
b) a nyíróerő a súllyal egyenes arányban nő;
c) a tárgy elkezdi csúszni, az erő lecsökken;
d) csúszás alatt a csúszó súrlódási együttható által meghatározott állandó erő



10. ábra

A tapintásérzékelő rendszer szoftverének pillanattfelvétele

Ha a szorítóerő túl kicsi, a pohár megcsúszhat. A rendszer ezt érzékeli és a tapintásból származó információ alapján megnöveli a robot ujjai által kifejtett erőt, hogy a csúszás megálljon.

A nyíróerők mérésére alkalmas tapintóeszköz hatalmas előnye, hogy a csúszási határérték ismeretében a robotkart még a megcsúszás előtt figyelmeztetni lehet a bekövetkező eseményre, megelőzve ezzel a tényleges elmozdulást (12. ábra).

7. Összefoglalás, alkalmazások

Az előzőekben ismertettük egy komplex tapintásérzékelő tömb fejlesztésének menetét. Az érzékelő tömbök fő újdonsága, hogy a taxelekben támadó erő-vektor mindhárom komponensét képesek érzékelni. Az oldalirányú, nyíróerők mérése a magas szintű tapintási-megfogási feladatok alap követelménye, mivel súrlódási viszonyok szinte minden tapintási eseményben jelen vannak.

Az MFA-ban fejlesztett tapintásérzékelő tömböket elsősorban orvostechikai alkalmazásokban kívánjuk hasznosítani a TactoLogic Kft. termék-fejlesztéseiben. Endoszkópra, katéterre, autonóm mikro-robotokra szerelve a miniatűr érzékelők rendkívül hasznos többlet információt tudnak nyújtani olyan helyekről is, ahol az emberi tapintás nem kivitelezhető.

Az érzékelőkkel számszerűsíthetővé tehető a fizikális diagnosztika is. Tapintás-kijelzőkkel felszerelt rendszerrel megoldható lesz majd a tapintási távjelenlét és hosszú távon az érzékelők akár végtag protézisekbe is beépíthetők lesznek.

Köszönetnyilvánítás

A tapintás érzékelés fejlesztése a Széchenyi Program TELESENSE projekt támogatásával indult.

Irodalom

- [1] G. Vásárhelyi, M. Ádám, É. Vázsonyi, Zs. Vízváry, A. Kis, I. Bársony, Cs. Dücső, "Characterization of an Integrable Single-Crystalline 3D Tactile Sensor," IEEE Sensors Journal, Aug. 2006, Vol. 6, No.4., pp.928–934.
- [2] G. Vásárhelyi, M. Ádám, É. Vázsonyi, I. Bársony, Cs. Dücső, „Effects of the Elastic Cover on Tactile-Sensor Arrays,” Sens. Actuators A, 2006, Vol. 132, pp.245–251.
- [3] G. Vásárhelyi, B. Fodor, T. Roska, „Tactile Sensing-Processing: Interface Cover Geometry & the Inverse Elastic Problem,” Sens. Actuators A, 2007, Vol. 140, pp.8–18.
- [4] Zs. Vízváry, P. Fürjes, M. Ádám, Cs. Dücső, I. Bársony, "Mechanical Modelling of an Integrable 3D Force Sensor by Silicon Micromachining," National Institute for Research and Development in Microtechnologies (Bucharest) (ed.) Special issue featuring selected papers from the 13th European Micromechanics workshop, MME'02, Bristol, Institute of Physics Publishing, 2003. pp.165–168.
- [5] É. Vázsonyi, M. Ádám, Cs. Dücső, Zs. Vízváry, A.L. Tóth, I. Bársony, "Three-dimensional Force Sensor by Novel Alkaline Etching Technique," Sens. Actuators A, Vol. 123-124, No.23., Sept. 2005, pp.620–626.
- [6] M. Ádám, T. Mohácsy, P. Jónás, Cs. Dücső, É. Vázsonyi, I. Bársony, "CMOS Integrated Tactile Sensor Array by Porous Si Bulk Micromachining", Sens. Actuators A, 2007, In Press, Corrected Proof, Available online 6 August 2007.
- [7] A. Kis, F. Kovács, P. Szolgay, "3D Tactile Sensor Array Processed by CNN-UM: A Fast Method for Detecting and Identifying Slippage and Twisting Motion", International Journal on Circuit Theory and Application (CTA), 2006, No.34., pp.517–531.

HTE-hírek

Gordos Géza 70 éves

A szeptemberben megrendezésre került „A beszédtechnológia kora” című szakmai konferenciát a HTE az idén 70 éves Prof. Dr. Gordos Géza, a HTE tiszteletbeli elnökének tiszteletére szervezte – a pályatársak hathatós közreműködésével. A következőkben a Prof. Dr. Lajtha György tollából készült beszámolót olvashatják.

Közel százan jöttünk össze szeptember 21-én délben, hogy néhány hónappal a születésnap után, de annál több szeretettel és tisztelettel megünnepeljük kedves barátunk és sokak tanítómesterének születésnapját. Az M1-es autópálya mentén elhelyezkedő Sasfészek Fogadó Budapesthez közel – mégis a nagyváros zajától elszigetelve –, igazán alkalmas hely volt egy ilyen családi-as összejövetelre; mind a köszöntők elmondására, mind a jóízű vacsora elfogyasztására kiválóan megfelelt.

A vacsorát megelőzően és az alatt Géza barátai mondtak sorra köszöntőket. A megszólalók hangsúlyozták az ünnepelt pedagógiai készségét, új iránti fogékonyságát és csapatépítési tehetségét. Mindhárom adottságának hasznosítását számos példával támasztották alá. Igen árnyaltan megjelent ezek során egy eredményes életpálya több fontos pontja. Ezen túlmenően emberi tulajdonságai, segítőkészsége és problémamegoldó tehetsége a kutatói és pedagógiai munkásságát egyaránt magas szintre emelték.

Az így szárazon felsorolt jellemzők persze mind az ünnepelt, mind az ünneplők előadásaiban kellő humorral és iróniával fűszerezve, élvezetes és szórakoztató délutánna álltak össze. Megismerhettük Géza életútját, ezen belül tudományos és pedagógiai eredményeit. Egyértelműen megmutatkozott, hogy olyan csapatot épített maga körül, mellyel nemcsak belföldön, hanem külföldön is nagyra értékelt eredményeket értek el.

Érdemes hangsúlyozni, hogy elméleti és pedagógiai munkásságán túlmenően az ipari fejlesztés területén is eredményes volt. Éveken keresztül szakértőként dolgozott a Posta Kísérleti Intézetben, ahol zajméréssel, az átviteli utak terhelésével és a minőségi követelmények megfogalmazásával kapcsolatban jelentős és gyakorlatban jól hasznosítható munkái voltak. Ipari ténykedését később is folytatta és az Ericssonnal közösen megalapította a Nagysebességű Hálózatok Laboratóriumát, melynek alapító elnöke lett. Ennek köszönheti, hogy nemcsak az egyetemen belül, hanem szolgáltatói területen is mind belföldön, mind külföldön megismerték tehetségét és eredményeit.

Különleges emberekkel kialakított kapcsolatának történetei és a számtalan érdekes élethelyzetre való visszaemlékezések tették a délután minden percét szórakoztatóvá és emlékezetessé. Többben tekintettek vissza különböző szintű és jellegű együttműködésekre, melynek jellegét mindig Géza tudása és stílusa szabta meg. Mindenki igyekezett oldani az ünnepélyességet és kötetlenné, vidámmá tenni a hangulatot. Így összességében ez a születésnap nemcsak visszatekintés, hanem érdekes és szórakoztató előadások összessége is volt.

Boldog születésnapot kíván a teljes HTE!

Pap László az MTA rendes tagja

Pap László professzor, a HTE tiszteletbeli elnöke 2007. szeptember 20-án tartotta akadémiai székhelyi előadását. Az előadás címe „Interferencia vezeték nélküli kommunikációs hálózatokban” volt.

Pap professzor közismerten kiváló előadó. Erről az igen szép számú érdeklődő közönség is meggyőződhetett. Az előadás olyan bevezetéssel kezdődött, amely a nem szakmabelieknek is érthető módon vázolta a vizsgált területet, a vizsgált jelenségek fogalmait és alapösszefüggéseit. Ezek után a tágabb szakértői kör számára szemléletesen tárgyalta három távközlő rendszer frekvenciaanalízisét. Ezek: a lassú frekvenciaugrások rendszer, a különböző PSK rendszerek, és BPSK, illetve QPSK modulációt alkalmazó csomagkommunikációs (ALOHA) hálózatok.

A professzor és munkatársai mindhárom esetre új analízis-eljárást dolgoztak ki, amelynek eredményeként a keresett jellemző mennyiséget (a hibaarányt, a jel/zaj+interferencia-viszony statisztikáját) zárt alakban kapjuk meg. Ennek jelentőségét nehéz lenne túlbecsülni. Az így kapott kifejezések lehetővé teszik számos további rendszerjellemző mennyiség viszonylag egyszerű és pontos számítását.

Az előadás befejező része új kutatási irányokat vázolt fel a csatorna jel/zaj+interferencia viszonyának statisztikai leírására és csatornkapacitás számítására bonyolult fadings csatorna esetén. Mindkét javaslat új és nagyon szellemes analitikus eljárásra vezet.

Az előadás meggyőzően bizonyította Pap professzor magas szintű kutatói habitusát és iskolateremtő képességét.

Gratulálunk és további hosszú, sikerekben és örömeiben gazdag pályafutást kívánunk!

Október 9-én a Cisco Magyarország és a T-Systems képviselői átadták a Bethesda Gyermekkórház számára azt a világszínvonalú kórházi informatikai rendszert, amelynek adományozásáról még ez év tavaszán határozott a két vállalat.

A legmodernebb informatikai és kommunikációs megoldások bevezetése mellett a projekt megvalósításának egyik legfőbb eredménye a Fehér Könyv, amelyben számos minőségi és mennyiségi mutató konkrét számításokkal támasztja alá az új infokommunikációs rendszer gyors megtérülését, így a benne felhalmozott know-how átadása révén nagy segítségére lehet más intézményeknek is hasonló rendszerek kiépítéséhez.

Rékasi Tibor, a Cisco Magyarország ügyvezető igazgatója és Tankó Zoltán, a T-Systems vezetője ünnepélyes keretek között adták át a 130 millió forint értékű rendszer elkészültét jelképező jegyzőkönyvet, amelyben dokumentálták azt a folyamatot, melynek köszönhetően az elmúlt 7 hónapban a 135 aktív ágygal működő Bethesda Kórház két budapesti épületében bevezették a legmodernebb infokommunikációs eszközöket és szolgáltatásokat. Többek között új vezetékes és vezeték nélküli hálózat, új számítógépek és nyomtatók kerültek az intézménybe, klinikai és kórházmenedzsment-szoftver, beteghívó és betegirányító rendszer, IP-telefonía és ehhez kapcsolódó dual-phone megoldás, rádiófrekvenciás helymeghatározó (RFID) rendszer, elektronikus aláírás, távoktatási megoldás és számos más újdonság készült el, amelyek mind a betegellátás színvonalának, a betegek komfortérzetének és a működés hatékonyságának növelését segítik. Az adomány keretében a T-Systems 3 évig biztosítja az eszközök üzemeltetését, háttértámogatását.

• • •

Október 19-én a Microsoft Magyarország Kft. – a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemmel és a Magyar Feltalálók Egyesületével együttműködésben – ünnepélyes keretek között megnyitotta a budapesti Microsoft Innovációs Centrumot (MIC). A MIC az Infopark "I" épületében 75 négyzetméter labor- és konzultációs, valamint tesztelési területtel áll a célközönség rendelkezésére.

A BME elkötelezett az intenzív alapképzésen, kutatáson, fejlesztésen és innováción alapuló differenciált, többszintű és magas színvonalú oktatás, valamint a műszaki és természettudományok terén, illetve a közgazdasági és társadalomtudományok egyes területein nyújtott tudományos képzés mellett. A nonprofit szervezetként működő MAFE pedig a feltalálók és a szabadalmak tulajdonosainak érdekeit képviseli és védelmezi, így segítve elő az innovatív gondolkodást és a kreatív munkát elismerő és támogató gazdasági környezet kialakítását. A Microsoft Innovációs Centrumok célja, hogy elősegítsék az innovációt, és támogassák a helyi szoftveripar fejlődését, együttműködve az ipari, oktatási és kormányzati szereplőkkel.

Az Ericsson és a Deutsche Telekom szerződést írt alá az Ericsson VDSL-megoldása telepítésére vonatkozóan, amely az Ericsson EDA 1200 alapú csúcstechnológiájú szélessávú hozzáférési megoldása. Ez a lépés felgyorsítja az innovatív szélessávú szolgáltatások bevezetését Németország legnagyobb városaiban, ahol a felhasználók akár 50 Mbps letöltési sebességet is lehetővé tévő nagy sebességű internet-hozzáférést használhatnak majd.

Az Ericsson EDA 1200 VDSL2 megoldása Ethernet-technológián alapul és nagybani szélessávú telepítések gyors és költséghatékony végrehajtásának támogatására fejlesztették ki. Ez a jövőálló megoldás támogatja a triple-play szolgáltatásokat, valamint a Deutsche Telekom T-Home kínálatának alapjául szolgál. Az VDSL2 platform kezelését az Ericsson ServiceOn Access megoldása, egy többtechnológiájú hálózatzkezelési rendszer biztosítja majd, amely lehetővé teszi nagy sebességű hálózatok végpont-végpont kezelését.

Az Ericsson EDA 1200 VDSL2 megoldása 2006-ban elnyerte az International Engineering Consortium, IEC InfoVision díját a legjobb és leginnovatívabb hozzáférési technológia megvalósításáért.

• • •

A Sun Microsystems Inc. bemutatta első négymagos, x64-es (x86-os, 64 bites) számítógépeit, köztük a világ legkisebb, négy processzorfoglalatosszerverét, amely feleakkora mérete ellenére más szerverekhez képest akár kétszeres bővíthetőséget és számítási teljesítményt kínál. Az Intel Xeon processzorokra épülő Sun Fire X4450 és Sun Fire X4150 szerverek jelenlegi vetélytársaiknál kisebb helyigényt, nagyobb teljesítményt és hatékonyabb energiafelhasználás mellett teszik lehetővé az adatközpontokban felmerülő kritikus problémák megoldását. Mindkét kiszolgálóhoz több operációs rendszer – így Solaris OS, Windows, Linux vagy VMware – közül választhatnak a felhasználók, és az alkalmazások széles skálájának telepítésére kínálnak lehetőséget.

A 7300-as sorozatú, négymagos Intel Xeon processzorra épülő Sun Fire X4450 szerver az első és mindeddig egyetlen négymagos, négy processzorfoglalatoss, 2U magasságú rendszer a vezető gyártók kínálatában. Versenytársaikhoz képest kétszer akkora számítási teljesítményt és memóriát kínál alig feleakkora energiafelhasználás mellett. A négymagos, 5300-as sorozatú Intel Xeon processzorra épülő Sun Fire X4150 szerver olyan két processzorfoglalatoss, 1U magas kiszolgáló, amely a vetélytárs kétfoglalatoss, 1U magas szerverekhez képest akár kétszer nagyobb memóriakapacitással, belső tárolóval és hálózati csatlakozási lehetőséggel rendelkezik. Több mint egy terabájtos (TB) nagyteljesítményű belső lemezegységével a Sun Fire X4150 szerver ideális megoldás a horizontális, azaz több alkalmazást egyszerre kiszolgáló adatbázisok, és egyéb tárhelyigényes és intenzív lemezhasználatú járó alkalmazásokhoz.

Application of Auger Electron Spectroscopy (AES) for measurements in the analysis of telecommunication and vacuum technology devices

Keywords: AES depth profiling, thin film resistors, GMR

The last 40 years research of the Surface Physics Department of MFA has been summarized from the point of view of telecommunication industry. It is demonstrated that surface analysis by AES and even the usual version of AES depth profiling provided important data on the oxidation processes of thin film resistors. The developments of the method (grazing angle of incidence of low energy ions, rotated sample) introduced by us resulted in nm of depth resolution applicable for the research of samples showing GMR. The application of surface physics research to tungsten research is discussed separately.

Application of the EGA volatile component analysis method in the technology of A^{III}-B^V semiconductors

Keywords: contacting A^{III}-B^V semiconductors, evolving gas, mass spectrometry, optimum parameters

This paper presents the studies of interactions between A^{III}-B^V compound semiconductors (GaAs, GaP, InP) and metal contacts, applying mainly the EGA method. The goal of the work is the understanding of the processes and the demonstration of the applicability of the mass spectrometric methods. Results obtained supply informations on the thermodynamical and metallurgical processes taking place in the system during contacting. The study of ohmic contacting by applying mass spectrometry, electrical measurements and electron microscopy resulted in the determination of the optimum parameters of heat treatment.

GaInAsP/InP infrared diodes and lasers

Keywords: semiconductor lasers, diodes, GaInAsP, InP, liquid phase epitaxy

GaInAsP/InP semiconductor lasers and infrared emitting diodes have been prepared. Liquid phase epitaxy (LPE) method was developed for the growth of GaInAsP and InP layers. This method was successfully applied for preparation of novel semiconductor devices structures. In this paper we describe the new lasers and infrared emitting diodes prepared in our laboratories, and summarize their most important parameters and application fields.

Makyoh topography: a simple and efficient method for investigation of flatness of semiconductor slicewafers

Keywords: semiconductors, flatness, optical metrology

The paper describes the research carried out in our Institute in the field of Makyoh topography, an optical metrology tool based on an ancient principle. The application of the method is the qualitative and limited quantitative study of the flatness of mirror-like surfaces.

Indoor application of PIII solar cells

Keywords: solar cells, c-Si, PIII, indoor illumination

This article introduces the recent scientific results reached at MFA in the field of crystalline Si solar cells. We compare the amorphous Si and the conventional crystalline Si solar cells with our crystalline Si solar cell designed for indoor irradiance in several illuminations. We show that in case of mixed light that often occurs in real circumstances our indoor crystalline Si solar cell performs prosperously.

Solar Cell Innovation Center at the Research Institute for Technical Physics and Materials Science

Keywords: solar cells, Cu(InGa)Se₂, vacuum technologies

This paper introduces to the reader one of the largest facilities of the solar cell research and development in Hungary – the Solar Cell Innovation Center. The R&D equipment is an integrated vacuum system designed and built for the preparation of thin film Copper Indium Gallium diSelenide (CIGS) solar cell layer structures. The facility was built on the premises of the Hungarian Academy of Sciences by the EnergoSolar Co. in the frame of a main project funded by the Hungarian National Office for Research and Technology. This paper reviews the layout of the solar cell structure and the equipment for its preparation, introduces the main materials science issues raising in the CIGS system and presenting challenges for the research.

Noise-limited sensitivity of thermistors and bolometers

Keywords: sensor, thermistor, resistor-thermometer, thermal noise, 1/f noise, generation-recombination noise

The noise limited sensitivity of two fundamental types of resistor-thermometers, that of thermistors and bolometers will be discussed. The noise components considered are thermal noise, 1/f noise and the generation-recombination noise. The equivalent instabilities in temperature, power and short energy pulses caused by the noise fluctuations will be calculated – considering the maximum operation and signal processing speed permitted by the thermal relaxation of the sensor. The calculations were also carried out for three different practically realised sensors. According to the major conclusion the operation speed in high frequency applications of miniature sensors is limited by the thermal noise. The main influencing design parameter is the thermal capacity of the device.

Non-volatile nanocrystal semiconductor memory elements

Keywords: nanocrystal, memory transistor, silicon nitride

The problems connected with the operation of non-volatile semiconductor memory elements and a possible solution with nanocrystal structures are briefly summarized. Preparation methods of nanocrystal MNOS structures and the best published results are introduced. Charge injection and charge storage properties of MNOS structures with embedded Si and Ge nanocrystals prepared by the authors are presented.

Integrated tactile sensors – design and signal processing

Keywords: tactile sensor, MEMS, elastic cover, three-axial force sensor

Tactile sensors are commonly used in the industry, in medical or virtual reality applications, but most of the tactile systems are only capable of measuring one dimensional pressure profiles. In this article we present a state of the art tactile system that can measure all three components (normal and shear) of the attacking forces at many taxels (tactile pixel) in an array. First, we present the manufacturing technology of the micro-sensors. After, we show how the mechanical elastic cover contributes to the information coding properties of the sensors. Finally, we demonstrate the importance of the three-axial tactile signals through a robotic application example.

Contents

<i>COMPETITIVE SCIENCE – 50TH ANNIVERSARY OF THE RESEARCH INSTITUTE FOR TECHNICAL PHYSICS AND MATERIALS SCIENCE OF THE HUNGARIAN ACADEMY OF SCIENCES</i>	1
Miklós Menyhárd, György Gergely Application of Auger Electron Spectroscopy for measurements in the analysis of telecommunication and vacuum technology devices	2
László Dobos, György Gergely, Imre Mojzes, Dezső Szigethy Application of the EGA volatile component analysis method in the technology of A ^{III} -B ^V semiconductors	6
Vilmos Rakovics, Sándor Püspöki, Miklós Serényi, István Réti, János Balázs, István Bársony GaInAsP/InP infrared diodes and lasers	12
Ferenc Riesz, István Endre Lukács, János Szabó, János Makai, Zsolt Laczik, Bálint Pődör, István Réti, Béla Szentpáli, Imre Eördögh Makyoh topography: a simple and efficient method for investigation of flatness of semiconductor slices/wafers	19
Edvárd Kuthi, István Pintér, Tibor Mohácsy, Antalné Ádám, Béla Szentpáli, István Bársony Indoor application of PIII solar cells	25
Ágoston Németh, Zoltán Lábadi, István Bársony Solar Cell Innovation Center at the Research Institute for Technical Physics and Materials Science	30
Béla Szentpáli Noise-limited sensitivity of thermistors and bolometers	35
Péter Basa, Zsolt József Horváth, Tamás Jászi, György Molnár, Andrea Edit Pap, László Dobos, Lajos Tóth, Béla Pécz Non-volatile nanocrystal semiconductor memory elements	43
Gábor Vásárhelyi, Attila Kis, Antalné Ádám, Csaba Dücső, István Bársony Integrated tactile sensors – design and signal processing	47
HTE-News Celebrating Professor Géza Gordos' 70th birthday Prof. László Pap elected to Full Member of the Hungarian Academy of Sciences	53

Szerkesztőség

HTE Budapest V., Kossuth L. tér 6-8.
Tel.: 353-1027, Fax: 353-0451, e-mail: info@hte.hu

Hirdetési árak

Belív 1/1 (205x290 mm) FF, 120.000 Ft + áfa
Borító II-III (205x290mm) 4C, 180.000 Ft + áfa
Borító IV (205x290mm) 4C, 240.000 Ft + áfa

Cikkek eljuttathatók az alábbi címre is

Szabó A. Csaba, BME Híradástechnikai Tanszék
Tel.: 463-3261, Fax: 463-3263
e-mail: szabo@hit.bme.hu

Előfizetés

HTE Budapest V., Kossuth L. tér 6-8.
Tel.: 353-1027, Fax: 353-0451
e-mail: info@hte.hu

2007-es előfizetési díjak

Közületi előfizetők részére: bruttó 32.130 Ft/év
Hazai egyéni előfizetők részére: bruttó 7.140 Ft/év
HTE egyéni tagok részére: bruttó 3.570 Ft/év

Subscription rates for foreign subscribers:

12 issues 150 USD,
single copies 15 USD

www.hte.hu

Felelős kiadó: NAGY PÉTER
Lapmenedzser: DANKÓ ANDRÁS

HU ISSN 0018-2028

Layout: MATT DTP Bt. • Printed by: Regiszter Kft.