

dc\_238\_11

## **III-V-anyagú alacsonydimenziós struktúrák**

MTA doktori értekezés tézisei

Nemcsics Ákos

Magyar Tudományos Akadémia  
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet  
és  
Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar  
Mikroelektronikai és Technológiai Intézet  
Budapest  
2011

## A kutatás tárgya és célkitűzései

A félvezető eszközök, a számítógép megjelenése alapvetően megváltoztatta a kultúránkat. A mikroelektronika, a félvezetőtudomány soha nem látott fejlődésnek indult. E területen a legutóbbi időben az elektronikában eddig szokatlan újfajta anyagok, alacsonydimenziós rendszerek, ill. nanostruktúrák kutatása és alkalmazási lehetőségeinek bővülése jellemző. Noha a Si meghatározó félvezetőanyag az eszköztechnológiában, speciális tulajdonságaik okán a vegyület-félvezetők, ezen belül a III-V típusú anyagok széleskörűen elterjedtek, elsősorban az optikai és a nagyfrekvenciás eszközökben. Anyagtulajdonságok miatt a III-V típusú anyagok eszköztechnológiájában az epitaxiás eljárás alapvető lépés.

Szakmai pályám kezdete óta a fent említett félvezetős kutatásban dolgozom, és lehetőségeim szerint gyarapítottam eredményeit. Intézetünk (MTA MFA) jogelődjében, az MTA MFKI-ban GaAs epitaxiával és a rétegek vizsgálatával kezdtem el foglalkozni. Kutatási területem a gázfázisú epitaxiás (VPE-CVD) eljárással növesztett rétegek minősítése ill. technológiai és elektrofizikai paramétereik közötti összefüggések keresése volt. E rétegstruktúrák alapjául szolgáltak többek közt az intézetünkben kifejlesztett Gunn-, Schottky-, varaktor diódáknak. A rétegvizsgálatokat galvanomágneses, fotolumineszcenciás és kapacitás-feszültség (CV) méréssel (Hg-szondás ill. elektrokémiai) végeztem. A GaAs-ból készíthető nagy ellenállású hordozó az eszközök integrálásának lehetőségét vetítette elő. E nagy ellenállású minták mérésére kollégáimmal Európában referenciának számító mérőrendszert állítottunk össze.

Az elektrokémiai CV mérés esetén (állandó mértékű előfeszítés és az elektrokémiai oldás segítségével) a vizsgáló Schottky-jellegű átmenet elektromos letörését kerülhetjük el. Ezáltal lehetővé válik a fent említett eszközök több mikron vastagságú epitaxiás rétegszerkezeteinek vizsgálata is. E mérési módszer a minősítésben praktikus, de a kontaktusrétegek és a meredek átmenetek, heteroátmenetek vizsgálata rámutatott arra, hogy az elektrolit-félvezető átmenetet alaposabban vizsgálni kell. E témából írtam az egyetemi doktori disszertációm.

1990-től 1992-ig vendégkutatóként dolgoztam a Kieli Egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében. Ott továbbra is III-V-ös anyagok epitaxiájával foglalkoztam. A munkám során egy új technológiával, a molekulásugár-epitaxiával (MBE) ismerkedtem meg. Itt említendő meg, hogy az MBE-berendezés több mint egy egyszerű epitaxiás reaktor. Az MBE egy komplett kutatólaboratórium, hiszen a növekedő struktúra in-situ módon vizsgálható. E vizsgálatra széleskörűen elterjedt a sűrűségi elektron-diffrakció (RHEED). Az MBE-vel végzett munka során sikerült az eltérő rácsállandójú  $x = 0.4$  In-tartalommal rendelkező  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  technológiáját kidolgozni és az elektromos sáv szerkezetét kimérni. Egy nem „kommerciális” MBE berendezésen dolgozva értem el eredményeimet, mely berendezés fejlesztésében én is részt vettem. Az  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  rétegek technológiájával kapcsolatos eredményeimből készítettem a kandidátusi disszertációm. A Kielben végzett munkámat egy általam kiválasztott berendezéssel honorálta a német állam. (Gondolva egy hazai MBE-berendezés megvalósítására, egy nagy teljesítményű turbomolekuláris szivattyúállást kértem. Az MBE berendezésünk megvalósulásáig ezt máshol jól tudtuk használni.) Az MBE technológia és az in-situ vizsgálat lehetősége nagy hatást tett a további tudományos érdeklődésemre. Az eljárásban rejlő perspektívákat is szem előtt tartva szerettem volna az MBE-technológiát itthon is meghonosítani. A berendezés igen magas ára miatt a beszerzésre, ill. megvalósításra pályázati forrás nélkül aligha gondolhattunk. Többször is pályáztunk

sikertelenül, noha az elképzelés szakmai körökben támogatottságot élvezett (pl. Kormány Teréz, Mojzes Imre).

Közvetlenül a hazatérésem utáni munkáim egyike egy zárterű gáztranszporton alapuló (CSVT) GaAs epitaxiás reaktor tervezése és építése volt. Majd az epitaxiás rétegekben lévő diszlokációk eloszlásának vizsgálata GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As átmenetben.

Egy többéves kényszerű „munkaszünet” elfoglaltságot kereső lábadozási időszaka és az a tény, hogy a GaAs ideális anyag a napenergia-konverzióra, a napelemek kutatása felé fordította a figyelmemet [C2, C4, C8]. A munkába való visszatérésem után szerencsés módon az MFA-ban napelemekkel kapcsolatos kutatásokba kapcsolódhattam be (CIS-, a-Si:H-alapú és elektrokémiai napelem), ill. kaptam felkérést a Kandó Kálmán Műszaki Főiskolán (a BMF, ill. később az ÓE egyik jogelődje) szakmai tantárgyak és napelemek oktatására [C2, C8, C9, C22, C27, C31, C32]. A napelemanyagok kutatása terén elért eredmények között a porlasztással előállított amorf Si-ban a hidrogén- ill. adalék-beépülésének értelmezése, ill. a transzporttulajdonságok magyarázata említendő meg [C11, C15, C26, C31, C35, C44]. Az elektrokémiai napelem nagy problémája az ún. fotokorrózió. Azok az anyagok, amelyek ellenállnak ennek a hatásnak, - szinte kivétel nélkül - nem ideálisak a napenergia-átalakításra. Sikerült egy konverzióra megfelelő és a fotokorróziós hatásnak ellenálló anyagot találnunk (Cd<sub>4</sub>GeSe<sub>6</sub>). Az itt elért eredmények közt kiemelendő az anyag elektromos sávszerkezetének, a kristályszerkezetének és az elektrolit-átmenet helyettesítő képének meghatározása [C10, C12, C16, C17, C22, C27].

Az MBE kutatás iránti elkötelezettségem továbbra is megmaradt. Az első hosszabb, MBE-laborban töltött kutatási munka óta több MBE-laboratóriumban tettem látogatást (Lund, Varsó, Sapporo, Braunschweig, Göteborg, Parma, Pozsony), ill. sikerült többször több hónapot MBE-laborban (Kiel, Hamburg) dolgoznom. A kandidátusi védésem óta - különösen a kezdeti időszakban - elsősorban nem MBE-vel kapcsolatos kutatással foglalkoztam. A fent említett más félvezetős területeken is értem el tudományos eredményeket. Jelen doktori dolgozat koherens tartalma érdekében a tematikát az alacsonydimenziós és MBE-vel kapcsolatos területre szűkítettem. Ezért ki kellett hagynom a fentebb említett napelemanyagokkal kapcsolatos eredményeket a dolgozathoz ill. a tézisek közül. A dolgozatom témaválasztásának különös hangsúlyt ad az MTA MFA és a BMF MTI (ÓE jogelődje) által alapított és közösen működtetett MBE kutató laboratórium létezése [B3]. A labor alapját képező berendezéshez ajándékozás révén (Uni. Kiel) jutottunk hozzá, melyet a több éves tudományos kapcsolat alapozott meg. Az MBE berendezéssel kapcsolatos fejlesztéseket és az MBE növesztésekkel, struktúrákkal kapcsolatos kutatásokat, vizsgálatokat a két intézmény munkatársai ill. hallgatói közösen végezték ill. végzik, mely munka alapját képezi egy formálódó, a téma iránt elkötelezett hallgatókat is magába foglaló csoportnak. A dolgozatban ill. a téziskeben szereplő rétegek ill., nanostruktúrák legnagyobb részét a saját növesztéseim.

## **A tudományos háttér rövid összefoglalása**

Az alacsonydimenziós rendszerek alkalmazása forradalmi változást okozott a félvezető eszközök a területén. Ezek felhasználása egyrészt újfajta eszközök készítését teszi lehetővé, másrészt a meglévő eszközök hatásfokát növeli. Alacsony dimenziósak mondunk egy rendszert, ha legalább egyik térbeli kiterjedése a néhányszor 10 nm vagy annál kisebb mérettartományba esik, azaz kvantumviselkedés figyelhető meg a struktúrán. Kétdimenziós (2D) struktúrára példaképpen említhetjük a 2D elektrongáz tranzisztort, ahol a tranzisztor kapu-elektrodája alatt hozzuk létre a 2D-re korlátozó potenciálstruktúrát. Az eredmény ismert, az igen magas működési frekvencia. Egydimenziós (1D) rendszerre példaként említhetjük az

egy-elektron-tranzisztort. A nulladimenziós (0D) rendszerre példaként hozhatjuk a csatolt kvantumpontokat, melyek a tranzisztor alapú számítástechnikát válthatják fel, helyet adva az ún. kvantumszámítógépeknek.

A hatásfokemelés tekintetében tekintsük a szerzőnek kedves napelemeket. Egy konvencionális napelem hatásfoka anyagtól, struktúrától függően 5 és 15% között változik [C8]. Ha a konverzióra ideális GaAs-ból készítjük napelemet, egy egyszerű pn-átmenetes struktúra hatásfoka még mindig 30% alatt marad [C8]. A napelem hatásfokának további növelése a befogható spektrumtartomány szélesítésével lehetséges. E szélesítésnek anyagválaszték és technológiai korlátai vannak. Ezt megkerülendő kvantummechanikai eszközökkel, 2D struktúrák beépítésével folyamatosan változó abszorpciós réteget hozhatunk létre. Így a hatásfok 40% fölé is emelkedhet [C8]. Kvantumdrótokkal, azaz 1D struktúrákkal szintén növelhető a hatásfok. Koaxiális pn-átmenetes nanodrótokkal a felület igen nagy mértékben megnő, ezzel növelve a hatékonyságot. Polimer alapú napelemek esetében az exciton rekombinációját megakadályozva többszázszorosára is emelheti az amúgy meglehetősen alacsony, 1% alatti hatásfokot [C29, C43]. 1D struktúrák, ún. kvantumpontok alkalmazásával egy belső sávot hozhatunk létre az abszorpciós réteg tiltott sávjában, mely nincs összeköttetésben a külső kapcsokkal. Ezzel a megoldással úgy választhatjuk meg a paramétereket, hogy kis sötétáram mellett széles legyen az abszorbeált tartomány. Így akár 60 % feletti hatásfokot is elérhetünk [C43]. Ezek az igen magas hatásfokú napelemek ma már nem csak az űrbéli hanem a földi alkalmazásokban megjelentek koncentrátoros kivitelben.

A fent említett napelemek GaAs és rokon anyagokból épülnek fel. Ezek a félvezető anyagok a periódusos rendszer III. és V. oszlopának elemeiből állnak. Az összetételük szabadon változtatható, és kettőnél több komponensük is lehet. Az összetétellel a tiltott sáv szélessége változtatható, ahol esetenként a rácsállandó is változik. Az azonos rácsállandó okán pl. a GaAs/AlAs ill. GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As átmenet eszközökbeli alkalmazása rétegvastagságtól függetlenül elterjedt. Az InAs/GaAs ill. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs esetében a rácsállandóeltérés miatt más a helyzet. A rétegben lévő vastagságtól és összetételtől függő rácsfeszültség struktúraépítésre is felhasználható. A fent említett anyagok és struktúráiknak előállítása különböző epitaxiás módszerekkel lehetséges. Egyes struktúrák, ahol pl. fontos az atomi rétegpontosság, csak MBE-vel készíthetőek reprodukálható módon.

Az MBE egy UHV körülmények között létrejövő rétegnövesztési technika. A megfelelő szabadúthossz és tisztaság miatt a háttérnyomás kisebb kell legyen, mint  $10^{-10}$  Torr. Az MBE-kamrában egy fűthető mintatartón helyezkedik el a hordozó kristály, melynek felületére az atom és molekulaforrásokból a növesztendő anyag komponensei érkeznek. A hordozókristály hőmérséklete befolyásolja a felületi migrációt. A növesztési paraméterek függvényében különböző növekedési módok lehetségesek. A növekedést in-situ módon vizsgálhatjuk. A növesztés geometriája és az UHV környezet sűrűlősögű elektronsugaras vizsgálatot tesz lehetővé. Ez a már említett ún. RHEED (reflection high-energy electron diffraction), mely a nevével ellentétben nem egyszerűen diffrakció. A felülettel kölcsönható elektronsugár időben változó mintázatot hoz létre az elektronágyúval szemközt lévő fluoreszcens ernyőn. Bizonyos feltételek esetén a rétegnövekedés során e mintázat intenzitása oszcillál. Egy periódus pontosan egy monorétegnek (ML) felel meg. A kölcsönhatás igen összetett, mivel csak speciális esetben áll fenn a fenti ML-re vonatkozó állítás. A felületi kölcsönhatás ill a RHEED jel kiértékelése tudományosan igen sok felderítetlen részletet tartalmaz.

A kristály felületén a tömbi periodicitás megszakad. A felületen ill. a közelében elhelyezkedő atomok az energetikailag legkedvezőbb pozíciót felvéve a kristály belsejétől eltérő struktúrát vesznek fel. Ezt felületi rekonstrukciónak vagy szuperstruktúrának nevezzük. A felületi atomelrendezés technológiai paraméterek függvénye és alapvetően befolyásolja a reánövekedő réteg ill. nanostruktúra tulajdonságait. Tehát e felületi atomelrendeződés

tulajdonságainak megismerése ill. kézbentartása az MBE növesztés szempontjából alapvető fontosságú, melynek vizsgálati eszköze ugyancsak a RHEED.

Az epitaxiás növekedésnek alapvetően háromféle módja lehetséges. Az első a rétegről rétegre történő növekedés (Frank - van der Merwe típus). A felületre érkező atomok a hordozó kristályhoz erősebben kötődnek, mint egymáshoz. E növekedési módban új réteg épülése akkor kezdődik ha a megkezdett réteg épülése már befejeződött. Ilyen módon kvantumvölgyek, szuperrácsok építhetők. Ha a felületre érkező atomok egymáshoz erősebben kötődnek, mint a hordozóhoz, akkor klasztereződés alakul ki a felületen. Ez az ún. Vollmer - Weber növekedési típus. A két típus közötti átmenetet az ún. Stranski - Krastanov mód jelenti. A klaszterek és a hordozó között egy ún. nedvesítési réteg alakul ki. Ez a növekedési mód széleskörűen elterjedt az eltérő rácsállandójú (pl. InAs/GaAs-alapú) kvantumpontok előállításában.

Egy viszonylag új technológia az ún. csepp-epitaxia, mely az ún. Vollmer - Weber jellegű növekedés eredménye. A felületre először a III-as komponenst választjuk le, majd az V-ös komponens reaktortérbe engedésével alakul ki a végső félvezető nanostruktúra. A technológia újszerűségéből adódóan a növekedési kinetika még nem tisztázott. E tekintetben a felületen létrejövő nanostruktúra fejlődési folyamatának in-situ megfigyelése és a megfigyelhető RHEED-jel értelmezése különösen fontos feladat.

Az elkövetkezendő tézisekben szereplő GaAs, InGaAs és AlGaAs struktúrák MBE növesztése az alábbiak szerint történt, melyekre az adott helyen visszautalok: A GaAs és InGaAs felületek ill. rétegek GaAs (001) orientációjú hordozóra lettek növesztve 490 °C (ill. alacsony hőmérsékletű esetben 200 °C) mintahőmérséklet mellett. A tézisekben vizsgált csepp-epitaxiás nanostruktúrák hordozója GaAs (001) felületre növesztett 30% Al tartalmú AlGaAs felület volt. A felületre első lépésben 3.75 ML gallium lett leválasztva különböző fluxus (0.025 ML/s, 0.19 ML/s, 0.75 ML/s) és mintahőmérséklet (200 °C, 250 °C) mellett. A galliumleválasztást rövid várakozási idő (60 s) után különböző hőmérsékleten (300 °C, 350 °C) különböző nyomású ( $1 \times 10^{-4}$  Torr,  $5 \times 10^{-5}$  Torr,  $4 \times 10^{-6}$  Torr) arzénhátér követte. A felületen kialakuló struktúrák [1-10] irányú folyamatos súrolószögű elektronsugaras vizsgálat alatt voltak. A minták ex-situ vizsgálata atomerő-mikroszkóppal, transzmissziós mikroszkóppal és fotolumineszcenciával történt.

## Tézisek

### 2D struktúrák növekedésével kapcsolatos eredmények

#### 1. tétel: Eltérő rácsállandójú rétegek növekedésének vizsgálata

**1/1. altétel:** MBE-vel növesztett InGaAs/GaAs rétegek épülésénél (technológiát lásd fent) észlelhető RHEED oszcilláció lecsengéséből (a növekedésből és a rácsfeszültségből eredő hatás szétválasztásának segítségével) meghatároztam a kritikus rétegvastagságot. [A13, A17, A21, A30] (A tételhez kötődő további publikációk: [A16, A19, A27, A29, A37])

**1/2. altétel:** Megállapítottam (több módszerrel is igazolva), hogy a InGaAs/GaAs (001) síkkal párhuzamos rétegekben (technológiát lásd fent) a befűződő diszlokációk a [110] és [1-10] irányokban anizotrópiát mutatnak. [A8, A10] (A tételhez kötődő további publikációk: [A1, A2, A14, A20, A24, A25, A26])

**1/3. altézis:** Megállapítottam, hogy az alacsony hőmérsékleten (200 - 300 °C) növesztett GaAs rétegekben a rétegbe beépülő többlet arzén által okozott rácsfeszültség a RHEED oszcilláció időállandójából számolható [A28, A30, A31, A37]

## **2. tézis: A RHEED-oszcilláció és partikuláris viselkedésének magyarázata**

**2/1. altézis:** Magyarázatot adtam a felületi koherenciahossz segítségével a RHEED oszcilláció kezdeti fázisának a vizsgáló elektronsugár azimút és a beesési szögének változásától való függésére. [A15, A22, A30, A37]

**2/2. altézis:** A felületi szuperstruktúrák domén-jellegű viselkedése segítségével átfogó magyarázatot adtam a GaAs és InAs (001) felületen észlelhető RHEED-intenzitás hőmérsékletfüggésére. A két anyag közötti átmenetet jelentő InGaAs okán GaAs-nál elfajult spinszelep működéssel írtam le a tulajdonságot. [A41, A43, A45]

**2/3. altézis:** A kvantumösszefonódás segítségével a RHEED-oszcilláció egy szemléletes magyarázatát adtam meg [A48]

## **3. tézis: Epitaxiás rétegek és felületi morfológiájuk vizsgálata**

**3/1. altézis:** A GaAs (001) felület és különböző elektrolitokkal való átmeneteit vizsgáltam. Bevezettem a felületi morfológia számszerűsítésére a felületi érdességi számot. Meghatároztam a felületi érdességi szám és az előfeszítés közötti függvényt, valamint az érdességi szám és az eltávolított rétegvastagság függvényt. A függvény meredeksége a felsorolt elektrolitokra (0.1 M Tiron, 10% KOH, 0.5 M HCl, 10% NH<sub>4</sub>OH, 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) rendre emelkedő tendenciát mutat. [A7] (A téziszhez kötődő további publikációk: [A1, A2, A6])

**3/2. altézis:** Az elektrolitot mint transzparens elektródát felhasználva GaAs-elektrolit átmeneten a fotoáram méréséből a Gärtner-formulán alapuló megoldással töltéshordozó-diffúziós úthossz mérésére szolgáló eljárást dolgoztam ki. E módszerrel folyadék- és gázfázisú epitaxiás eljárással növesztett rétegeket vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a folyadékfázisú eljárással növesztett rétegekben kisebb a diffúziós úthossz. Az elektrolitos mérésrel kapott diffúziós úthosszak valóságát a rétegeken mért Hall-mozgékonyságok segítségével igazoltam. [A12]

**3/3. altézis:** MBE-vel növesztett AlGaAs/GaAs átmemeten alapuló rétegstruktúrákat vizsgáltam elektrokémiai módszerrel. A mérésnél az a probléma, hogy a GaAs mérésére megadott paraméterek esetén AlGaAs mérése hibás mélységet ad. Ezt az anomáliát az eltérő töltésátlépési kinetikára vezettem vissza. A G(V) és I(V) karakterisztikák segítségével több elektrolit közül a 0.1 M Tiron oldatot találtam alkalmasnak. Megállapítottam, hogy az anódos oldáshoz (0,3 V) és a méréshez (0,2 V) különböző feszültségeket kell használnunk, és meghatároztam ezek értékeit. Az így kapott eredményekett TEM és SR (spreading resistance) mérésrel is igazoltam. A méréshez a Si-re kifejlesztett SR mérést alkotó módon használtam III-V anyagokra. [A3, A11]

**3/4. altézis:** A réteg-eltávolítás és növekedés (kompozíció-dekompozíció) során a felületi morfológia önhasonló tulajdonságot mutathat. A GaAs (001) felületét 36% HCl: metanol (1:99) elektrolit-átmenettel 0.5 V előfeszítés mellett vizsgáltam. Megállapítottam, hogy elektrokémiai rétegeltávolítás után a visszamaradó felület fraktál-viselkedést mutat, melynek

dimenziója 1,59. [A9, A23, A38] (A téziszhez kötődő további publikációk: [A1, A34, A39, A42])

## **1D struktúrák**

### **4. tézis: Nanodrótok tulajdonságaival kapcsolatos megállapítások**

*4/1. altézis:* Magyarázatot adtam arra, hogy az ampullába zárt InP, ill. GaAs hordozóra fém-indukált módon növesztett nanodrótok anyaga az első esetben miért a hordozó anyagával megegyező, a második esetben pedig miért a hordozó komponenseinek oxidja. [A35]

*4/2. altézis:* Magyarázatot adtam arra, hogy elektronsugaras behatás során a nanodrót elkeskenyedése a vizsgált szakaszon a kristálystruktúra megváltozására (kübös – hexagonális átalakulás) vezethető vissza [A35].

## **0D struktúrák**

### **5. tézis: A csepp-epitaxiás kvantumpontokkal kapcsolatos eredmények**

*5/1. altézis:* Magyarázatot adtam az AlGaAs (001) felületre növesztett GaAs kvantumpontok (technológiát lásd fent) formája és a végállapotban észlelhető RHEED-intenzitáskép közötti kapcsolatra. [A33, A36]

*5/2. altézis:* Magyarázatot adtam a kvantumpontok (technológiát lásd fent) növekedési stádiumainak és a közben megfigyelhető RHEED-intenzitáskép közötti kapcsolatra, valamint magyarázatot adtam a GaAs nanostruktúra lépcsős oldalfala kialakulásának kinetikájára. [A36, A40, A44]

*5/3. altézis:* Magyarázatot adtam a leválasztott Ga fluxusa és a kialakult kvantumpontok sűrűsége közötti összefüggésre (technológiát lásd fent), valamint magyarázatot adtam a méret és a forma közötti összefüggésre. [A32, A51]

*5/4. altézis:* Megállapítottam, hogy a droplepitaxiás kvantumpontok (technológiát lásd fent) eloszlása jóval homogénebb, mint a feszültség-indukált módon előállítottaké. Ennek ellenére ez utóbbiaknál sokkal élesebb „shevron”-kép figyelhető meg. Magyarázatot adtam erre az ellentmondásra. [A40, A44]

*5/5. altézis:* Magyarázatot adtam arra, hogy GaAs kvantumpontok (technológiát lásd fent) esetén hogyan kerül Al a hordozóból a felületi nanostruktúrába, ill. hogyan alakul ki a hordozón a felületi Al-feldúsulás. [A40]

### **6. tézis: A csepp-epitaxiás kvantumgyűrűkkel kapcsolatos eredmények**

*6/1. altézis:* Magyarázatot adtam a GaAs kvantumgyűrűk (technológiát lásd fent) formája és a végállapotban észlelhető RHEED-intenzitáskép közötti kapcsolatra. [A36]

**6/2. altézis:** Magyarázatot adtam a kvantumgyűrű (technológiát lásd fent) növekedése során a [1-10] irányban észlelhető RHEED-kép időbeli lefolyására, valamint megmagyaráztam a kialakulás kinetikáját. [A36, A40, A50, A51]

**6/3. altézis:** Magyarázatot adtam arra, hogy hasonló homogenitás esetén a kvantumgyűrűk (technológiát lásd fent) kvantált állapotai miért adnak élesebb fotolumineszenciás csúcsot mint a kvantumpontok. [A46, A47]

## **7. tézis: Az inverz-kvantumpontokkal kapcsolatos eredmények**

**7/1. altézis:** Magyarázatot adtam a nanolyukak keletkezésének kinetikájára (technológiát lásd fent). Magyarázatot adtam arra, hogy azonos technológiai paraméterek mellett miért mélyebb a kisebb átmérőjű lyuk, mint a nagyobb átmérőjű. [A40, A50] (A tézishez kötődő további publikáció: [A40])

**7/2. altézis:** Magyarázatot adtam az inverz-kvantumpont növekedés kinetikájára, azaz arra, hogy nanolyukak betöltése során miért észlelhetünk a lyuk felett vastagabb réteget. [A49]

## **Eredmények hasznosulása**

Eredményeim beépültek a nemzetközi, félvezető anyagtudományba hozzájárulva ezzel a hazai tudományosság nemzetközi elismertségének növeléséhez. (E beépülést igazolandó, utalok Prof. B. A Joyce – a RHEED értelmezésének nagy doyenje, (Imperial Coll. London) – felkérése [A30] ill. Prof. M. J. Aziz (Harvard, Massachusetts; J. Appl. Phys. főszerk.) csoportjának hivatkozásaira, valamint arra, hogy a Science folyóiratból is kaptunk munkánkra [A32] hivatkozást.)

Az előzőekben – tézisek formájában - ismertetett eredmények legfőbb hasznosulása a hazai MBE-berendezés, ill. kutatólabor megvalósulása. Hasznosulás és eredmény továbbá a laborfejlesztésbe, minták vizsgálatába, mérések kiértékelésébe bekapcsolódó kollégák, hallgatók által formálódó kutató csoport, valamint az MBE-technológia hazai meghonosításához való hozzájárulás. [B2, B3, B4, B5, B7, B9, B10].

A fenti eredmények lehetővé tették egy RHEED kiértékelő program fejlesztését nanostruktúrák fejlődésének vizsgálatára. A cseppepitaxiás technika által többféle formájú nanostruktúra állítható elő. A kialakulás folyamán a RHEED kép intenzitás pontjai különféle átalakuláson mennek keresztül. Ezen átalakulások in-situ követése igen fontos szerepet játszik a növekedés kinetika megértésében. A jelenleg létező program (Saffire, készítette W. Braun) már időbelisége okán – mivel a csepp-epitaxia felfedezése előtt készült - sem alkalmas e feladatra. A programunkból - reményeink szerint - hamarosan termék lehet. [B6, B8].

A Faraday-cellával direkt módon mérhetjük az intenzitást, melynek tudományos hasznosulása a kritikus rétegvastagság meghatározásában valósult meg. [A27] Ehhez kapcsolódik a technológia in-situ kontrollja. Mivel a kritikus rétegvastagság nem csak a rácsállandóeltérés hanem a technológia függvénye is az időálló in-situ megfigyelésével egy direkt technológiai visszacsatolást hozhatunk létre.

Az eltérő rácsálladójú III-V-alapú rétegekben létrejövő befűződő diszlokációk vizsgálatára berendezést építettünk, mely a mintáink minősítésében hasznosult [B1, A24, A25].



A RHEED ágyúk esetén a gyártók az elektronsugár koherenciájára vonatkozó adatot nem adnak meg, (max. divergenciára találunk adatot). Bizonyos vizsgálatok esetében pedig hasznos lehet pl. a térbeli koherencia ismerete. A RHEED oszcilláció  $t_{3/2}/T$  periódusarányának meghatározásából lehetővé válik a RHEED-nyaláb koherenciahosszának a meghatározása [A15, A22].

A fent említett eredmények az oktatásban is hasznosulnak. Az MBE technológiáról és az alacsonydimenziós rendszerekről az általam előadott következő tantárgyakban van szó: Napelemek [C4] (villamosmérnök BSc, ÓE), Önszerveződő alacsony dimenziós rendszerek (mechatronika BSc, ÓE), Műszaki fizika (mechatronika MSc, ÓE), Kvantumszámítógépek avagy az önszerveződő nanostruktúrák (Alkalmazott Számtechnikai Doktori Iskola, ÓE).

A fenti eredmények a hallgatóknak nemcsak elméleti-, de a gyakorlati képzésében is hasznosul. Immár több éve az ÓE Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar hallgatói rendszeresen (önállólabor, szakdolgozat és TDK keretében) bekapcsolódnak az MBE labor installálásával kapcsolatosan felmerülő vezérlési és egyéb berendezésfejlesztési munkákba, valamint a tudományos kiértékelési feladatokba, ezáltal nem csak életszerű feladatot oldanak meg, hanem a nanotechnológiával és annak technikai hátterével is megismerkednek. Vezetésem alatt több hallgatói önállólabornak, 6 szakdolgozatnak és egy TDK dolgozatnak (2. helyezés) volt témája az MBE ill. megvalósulási helyszíne a laborunk.

### A tézisekhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

- [A1] **Á. Nemcsics**: Morphological investigation on electrochemically etched GaAs Surface; Ext. Abstr. of 7th Joint Vacuum Conf, May 26-29, 1997, Debrecen (ISBN 963-472-167-2) Ed. S. Bohátka) pp 163-164
- [A2] **Nemcsics Á.**, Dobos I, Dávid L: Investigation of non-selective material removal by electrochemical method on different III-V semiconductors, Acta Technica, 108 (1999) pp 521-531
- [A3] R. Kinder, **Á. Nemcsics**, R. Harman, F. Riesz, B. Pécz: A contribution to electrochemical C-V measurements on GaAs/GaAlAs multilayer structures; Proc. of 2nd Int. Conf. on Advanced Semicond. Devices and Microsystems, Smolenice Castle, Slovakia, 5-7 Oct. 1998, (Eds J. Breza, D. Donoval, V. Dorobny, F. Uherek) IEEE, ISBN 0-7803-4909-1 pp 215-218
- [A4] **Á. Nemcsics**, L. Dobos, B. Kovács, I. Mojzes: Pattern formation on the compound semiconductor Proc. of ASDAM'98, 2nd Int. Conf. on Advanced Semicond. Devices and Microsystems, Smolenice Castle, Slovakia, 5-7 Oct. 1998, (Eds J. Breza, D. Donoval, V. Dorobny, F. Uherek) IEEE, ISBN 0-7803-4909-1 pp 39-42
- [A5] **Á. Nemcsics**, L. Dobos: Investigation of InGaAs/GaAs heterostructures by electrochemical method; Proc. of Heterostructure Epitaxy and Devices (eds. P. Kordos, J. Novák) NATO Science Series 3. High Technology 48 Kluwer Acad. Publ. Dordrecht (1998) pp 135-138
- [A6] **Nemcsics Á.**: Kristályhibák vizsgálata vegyület-félvezető rétegszerkezetekben elektrokémiai módszerrel; Proc. of A ma és holnap fizikája Magyarországon, Fizikus Vándorgyűlés, Gödöllő, 1998. aug. 25-28. (Szerk. Pásztor G.) ELFT, Budapest, pp 239-241

- [A7] **Á. Nemcsics**: Contribution to the impedance analysis of GaAs-electrolyte junction; Phys. Stat. Sol. A 173 (1999) pp 405-415
- [A8] **Á. Nemcsics**, F. Riesz, L. Dobos: Selective electrochemical profiling of threading defects in mismatched heteroepitaxial systems; Thin Solid Films 343-344 (1999) pp 520-523
- [A9] **Á. Nemcsics**, I. Mojzes, L. Dobos: Investigation of morphology and fractal behaviour on compound semiconductor surface after electrochemical layer removal; Microelectronics Reliability 39 (1999) pp 1505-0509
- [A10] **Á. Nemcsics**, F. Riesz, L. Dobos: Selective electrochemical profiling of threading dislocations in mismatched InGaAs/GaAs heteroepitaxial systems; Phys. Stat. Sol. A 171 (1999) pp 283-288
- [A11] R. Kinder, **Á. Nemcsics**, R. Harman, F. Riesz, B. Pécz: Carrier Profiling of a Heterojunction Bipolar Transistor and p-i-n Photodiode Structures by Electrochemical C-V Technique, Phys. Stat. Sol. A 175 (2) (1999) 631-636
- [A12] **Á. Nemcsics**, K. Somogyi: Correlation between diffusion length and Hall mobility in different GaAs epitaxial layers; Proc. of ASDAM 2000, The 3rd Int. Conf. On Advanced Semicond. Devices and Microsystems, Smolenice Castle, Slovakia 16-18 Oct. 2000, (Eds J. Oswald, S. Hascik, J. Kuzmik, J. Breza) IEEE 00EX386 ISBN 0-7803-5939-9 pp 256-268
- [A13] **Á. Nemcsics**: Correlation between the Critical Layer Thickness and the Decay Time Constant of RHEED Oscillations in Strained InGaAs/GaAs Structures, Thin Solid Films 367 (2000) pp 302-305
- [A14] **Á. Nemcsics**, F. Riesz, J. Szabó, Z. E. Horváth, S. Gurbán: Makro topography study of the curvature and surface morphology of mismatched InGaAs/GaAs heterostructures; Phys. Stat. Sol. A 177 (2000) pp 231-236
- [A15] **Á. Nemcsics**: The initial phase shift phenomenon of RHEED oscillations, J. Cryst. Growth 217 (2000) pp 223-227
- [A16] **Á. Nemcsics**, F. Riesz: Effect of Lattice Mismatch on the Decay of RHEED Oscillations During Growth of Strained InGaAs/GaAs Heterostructures (poster); (MRS Spring Meeting, April 24-28 2000 San Francisco, California) Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 618 (2000) pp 225-230
- [A17] **Á. Nemcsics**: Growth control of the strained InGaAs/GaAs heterostructures for device purposes by decay of RHEED oscillation; Proc. of 10th Int. Workshop on the Physics of Semiconductor vol. I. Devices, Dec 14-18, 1999 (Ed. V. Kumar, S. K. Agarwal) ISBN 81-7023-997-4 Allied Publ Ltd, New Delhi (2000) pp 264-267
- [A18] **Á. Nemcsics**, L. Dobos, L. Dávid: Study of Polish Material Removal by Electrochemical Method on Different Compound Semiconductors; Inorganic Materials 36 (2000) pp 969-974
- [A19] **Á. Nemcsics**, Riesz F: Influence of Lattice Mismatch and Growth Rate on the Decay of RHEED Oscillation in the Case of InGaAs/GaAs Growth, Crystal Research and Technology 36 (2001) pp 1011-1017
- [A20] **Á. Nemcsics**, L. Dobos, F. Riesz: Electrochemical defect characterization of different compound semiconductor surfaces; Fizika, Elektrotechnika 112 (2001) pp 108-112

- [A21] **Á. Nemcsics**: Valuing of the critical layer thickness from the deading time constant of RHEED oscillation in the case of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs heterojunction; *Applied Surface Science* **190** (2002) pp 294-297
- [A22] **Á. Nemcsics**: Explanation of the initial phase change vs. incident angle of the RHEED intensity oscillation; *Thin Solid Films* **412** (2002) pp 60-63
- [A23] **Á. Nemcsics**, M. Schuszter, L. Dobos, Gy. Ballai: Morphological investigation of the electrochemically etched GaAs (001) surface; *Materials Science Engineering B* **90** (2002) pp 67-71
- [A24] **Á. Nemcsics**, J. P. Makai: Electrochemical profiling for semiconductor heterostructures; *J. Phys., Condensed Matter* **14** (2002) pp 13299-13304
- [A25] **Á. Nemcsics**, J. P. Makai: Defect profiling in semiconductor layers by the electrochemical method; *Semiconductors* **37** (2003) pp 657-660
- [A26] **Á. Nemcsics**, F. Riesz: Interpretation of the depth-dependent etch pit density in InGaAs/GaAs heterostructures; *Phys. Stat. Sol. C* **0** (2003) pp 893-896
- [A27] **Á. Nemcsics**, J. Olde, M. Geyer, K. Resföft: Remark to the Intensity Measurement of RHEED; *Instruments and Experimental Techniques* **48** (2005) pp 679-682
- [A28] **Á. Nemcsics**: Some Aspects of the RHEED Behaviour of Low-Temperature GaAs Growth; *FTP Semiconductors* **39** 2005 pp 1352-1355
- [A29] F. Riesz, J. Z. Domagala, **Á. Nemcsics**: An X-ray diffraction study of the structural properties of thick relaxed (100) InGaAs/GaAs heterostructures; *Phys. Stat. Sol. C* **2** (2005) pp 1298-1303
- [A30] **Á. Nemcsics**: Growth Information Carried by Reflection High-Energy Electron Diffraction; in *Quantum Dots: Fundamentals, Applications, and FRontiers* Eds. B. A. Joyce, P. C. Kelires, A. G. Naumovets, D. D. Vvedensky, NATO Sci. Ser. II. Mat., Phys. and Chem. – Vol 190 Springer Dodrecht (2005) pp 221-237
- [A31] **Á. Nemcsics**: Behaviour of RHEED oscillation during LT-GaAs Growth; *Acta Politechnica Hungarica* **4** (2007) pp 117-123
- [A32] Ch. Heyn, A. Stemmann, A. Schramm, H. Welsch, W. Hansen, **Á. Nemcsics**: Regimes of GaAs quantum dot self-assembly by droplet epitaxy; *Phys. Rev. B* **76** (2007) 0775317 1-4
- [A33] Ch. Heyn, A. Stemmann, A. Schramm, H. Welsch, W. Hansen, **Á. Nemcsics**: Faceting during GaAs quantum dot self-assembly by droplet epitaxy; *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 203105 1-3
- [A34] **Á. Nemcsics**, M. Schuszter, L. Dobos, P. Turmezei: Image Processing in the Material Science or Fractal Behaviour on the GaAs/Electrolyte Interface; *Proc. of 6th Int. Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2008) Sept. 26-27 2008 Subotica, Serbia (ISBN 978-1-4244-2407-8)* pp 1-4
- [A35] **Á. Nemcsics**, E. Horváth, S. Nagy, L. M. Molnár, I. Mojzes, Zs. J. Horváth: Some remarks to the nanowires grown on III-V substrate; *Proc. of 7th Int. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, Oct. 12-16, 2008 Smolenice, Slovakia (ISBN 978-1-4244-2325-5)* pp 215-218

- [A36] **Á. Nemcsics**, Ch. Heyn, A. Stemmann, A. Schramm, H. Welsch, W. Hansen: The RHEED tracking of the droplet epitaxial growth quantum dot and ring structures; *Materials Science Engineering B* 165 (2009) pp 118-121
- [A37] **Á. Nemcsics**: In-Situ Investigation of the Growth of Low-Dimensional Structures; in: *Towards Intelligent Engineering and Information Technology (Studies in Computational Intelligence vol. 243; eds.: I. J. Rudas, J. Fodor, J. Kacprzyk, ISBN 978-3-642-03737-5) Springer Verlag, Berlin* (2009) pp 557-572
- [A38] **Á. Nemcsics**, M. Schuszter, L. Dobos, P. Turmezei: Investigation of Electrochemically Etched GaAs (001) Surface with the Help of Image Processing; *Acta Polytechnica Hungarica* 6 (2009) pp 95-102
- [A39] **Á. Nemcsics**, Sz. Nagy, I. Mojzes, P. Turmezei: Fractal and Structural Entropy Calculations on the Epitaxially Grown Fullerene Structures with the Help of Image Processing; *Proc. of 7th Int. Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2009) Sept. 25-26 2008 Subotica, Serbia (ISBN 978-1-4244-5349-8)* pp 65-67
- [A40] **Á. Nemcsics**, L. Tóth, L. Dobos, Ch. Heyn, A. Stemmann, A. Schramm, H. Welsch, W. Hansen: Composition of the „GaAs” quantum dot, grown by droplet epitaxy; *Superlattices and Microstructures* 48 (2010) pp 351-357
- [A41] **Á. Nemcsics**, J. Takács, J. Bozsik: Modelling Hysteretic Phenomena in Surface Science; *Proc. of 8th Int. Symp. on Intelligent Systems SISY 2010 Sept. 10-11, Subotica, Serbia ISBN 978-1-4244-7395-3; pp 389-392*
- [A42] **Á. Nemcsics**, Sz. Nagy, I. Mojzes, R. Schwedhelm, S. Woedtke, R. Adelung, L. Kipp: Investigation of the surface morphology on epitaxially grown fullerene structures; *Vacuum* 84 (2010) 152-254
- [A43] **Á. Nemcsics**, J. Takács: Investigation of the hysteretic phenomena in RHEED intensity change in the study of surface reconstruction; *Acta Polytechn, Hung.* 7 (2010) pp 109-128
- [A44] **Á. Nemcsics**, L. Tóth, L. Dobos, A. Stemmann: Facetting of the self-assembled droplet epitaxial GaAs quantum dot; *Microelectronics Reliability* 51 (2011) pp 927-930
- [A45] **Á. Nemcsics**, J. Takács: Modelling of the hysteretic phenomena in RHEED intensity variation versus temperature for GaAs and InAs surfaces; *Semiconductors*, 45 (2011) 93-96
- [A46] **Á. Nemcsics**, J. Balázs, B. Pődör, J. Makai, A. Stemmann: Photoluminescence studies of GaAs quantum dots and quantum rings; *Phys. Stat. Sol. C*, 8 (2001) pp 2826-2829
- [A47] **Á. Nemcsics**, B. Pődör, J. Balázs, J. Makai, A. Stemmann; *Ext. Abstr. of 19th Int. Symp. on Nanostructures: Physics and Technology, Ekaterinburg, Russia, June 20-25, 2011*, pp 221-222
- [A48] **Á. Nemcsics**, Sz. Nagy: Plausible quantum-mechanical interpretations of RHEED oscillation; *Vacuum*, (2011) in press, available on line
- [A49] **Á. Nemcsics**, L. Tóth, L. Dobos, A. Stemmann, W. Hansen, Ch. Heyn: Cross-sectional transmission electron microscopy of GaAs quantum dots fabricated by filling of droplet-etched nanoholes; *J. Crystal Growth*, 335 (2011) pp 58-61
- [A50] **Á. Nemcsics**, A. Stemmann, J. Takács: To the understanding of the formation of the III-V based droplet epitaxial nanorings, *Microelectronics Reliability*, (2011) in press, available on line

[A53] **Á. Nemcsics**: Formation kinetics of the self-assembled droplet epitaxially grown III-V based nanostructures; Acta Polytechn. Hung., 8 (2011) pp 120-137

### Az eredmények hasznosulásával kapcsolatos publikációk jegyzéke

- [B1] **Á. Nemcsics**, J. P. Makai: Electrochemical investigation in mismatched heteroepitaxial structure; Ext. abstr. of 14th European Workshop on Heterostructure Technology, Smolenice Castle, Slovakia, Oct. 2-5, 2005 pp 54-55
- [B2] **Á. Nemcsics**, I. Réti, V. Kulin, R. Hodován, J. Gábor, G. I. Taar, J. Pántos, J. Bozsik, S. Molnár, G. Szenczi: Statusbericht des Installations einer MBE-Anlage an der gemeinsame Labor von MBE BMF-MTI und MTA-MFA; Konf. Kiadvány XXIV Nemzetközi Kandó Konferencia 2008 (110 év a műszaki képzés és kutatás szolgálatában) 2008. nov. 6-7. Budapest (ISBN 978-963-7154-74-4) pp 4 old
- [B3] **Nemcsics Ákos**: Nanotechnológiai laboratórium a főiskolán; BMF Hírlevél X. évf. (2009) febr. 2. szám 2. old.
- [B4] **Nemcsics Á.**, Réti I., Serényi M., Tényi V. G., Hodován R., Gábor J., Taar I. G., Pántos J., Bozsik J., Molnár S., Jankóné Rózsa M.: Beszámoló a BMF-MIT és az MTA-MFA közös laboratóriumában található MBE berendezés üzembe helyezéséről; Elektronikai Technológia, Mikrotechnika 48 (2009) pp 33-35
- [B5] **Nemcsics Á.**, Réti I., Tényi V. G., Kucsera P., Tóth L., Harmat P., Amadou M., Csutorás M., Kupás-Deák B., Sándor T., Bozsik J.: Molekulasugár-epitaxiás nanostruktúrák előállításának műszaki feltételei; Gép LXI (2010) pp 29-32
- [B6] **Á. Nemcsics**, M. Csutorás, G. V. Tényi, T. Sándor: Real Time RHEED Evaluation with the Help of Image Processing; Proc. of 8th Int. Symp. on Intelligent Systems SISY 2010 Sept. 10-11, Subotica, Serbia ISBN 978-1-4244-7395-3; pp 631-633
- [B7] P. Kucsera, G. V. Tényi, **Á. Nemcsics**, I. Réti: Control of the MBE Equipment for Growth of Nano Structures; Proc. of 8th Int. Symp. on Intelligent Systems SISY 2010 Sept. 10-11, Subotica, Serbia ISBN 978-1-4244-7395-3; pp 659-661
- [B8] Csutorás M., **Nemcsics Á.**, Sándor T.: RHEED kiértékelés képfelolgozás segítségével; Proc. of XXXVI Nemzetközi Kandó Konf. 2010 nov 4-5, Budapest ISBN 978-963-7158-04-9 CD-n 10 oldal
- [B9] Réti I., **Nemcsics Á.**, Harmat P., Tóth L., Tényi V. G., Kucsera P., Kupás-Deák B., A. Mieville, Hodován R., Turmezei P., Mészáros S., Battistig G, Bársony I.: Az MBE berendezés műszaki kérdései; Proc. of XXXVI Nemzetközi Kandó Konf. 2010 nov 4-5, Budapest ISBN 978-963-7158-04-9 CD-n 7 oldal
- [B10] Tényi V. G., **Nemcsics Á.**, Kucsera P., Réti I.: MBE berendezés üzembe helyezése és irányítása ipari vezérlővel; Proc. of XXXVI Nemzetközi Kandó Konf. 2010 nov 4-5, Budapest ISBN 978-963-7158-04-9 CD-n 11 oldal

### Az értekezés tárgyköréhez kapcsolódó egyéb publikációk jegyzéke

- [C1] **Á. Nemcsics**, L. Dobos: Investigation of InGaAs/GaAs Heterostructures by Electrochemical Method; Heterostructure Epitaxy and Devices HEAD'97 (eds.: P. Kordos, J. Novák) Kluwer Acad. Publ. pp 135-138
- [C2] **Nemcsics Ákos**: A napelemfejlesztés perspektívái; Proc. of XV. Kandó Konf. Budapest (1988) pp 8-12
- [C3] Zs. J. Horváth, A. Subrahmanyam, P. Manivannan, N. Balasubramanian, **Á. Nemcsics**, J. Karányi, M. Rácz and Vo Van Tuyen: Electrical and Photovoltaic Study of ITO/GaAs and ITO/InP Heterojunctions; 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion 6-10 July 1998 Vienna, Austria Vol III pp 3711-3714
- [C4] **Nemcsics Ákos**: A napelem működése, fajtái és alkalmazása; KKMF kiadója, Budapest (1999)
- [C5] **Nemcsics Á**: The experimental band structure of InGaAs (001), Acta Technica 108 (1999) pp 507-520
- [C6] Zs. J. Horváth, L. Dózsa, Vo Van Tuyen, B. Pődör, **Ákos Nemcsics**, P. Frigeri, E. Gombia, R. Mosca and S. Franchi: Growth and electrical characteristics of InGaAs/GaAs quantum well and quantum dots structures, Thin Solid Films pp 367 (2000) pp89-92
- [C7] **Á. Nemcsics**: Experimental Determination of the Valence Band Structure of the InGaAs (001) Surface; Inorganic Materials 36 (2000) pp 979-990
- [C8] **Nemcsics Á.**: A napelem és fejlesztési perspektívái, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001
- [C9] **Nemcsics Á.**: A napelemek spektrálérzékenysége; proc of XXVIII Kolorisztikai Szimpózium, 2001 szept. 3-5, Tata, pp 71-77
- [C10] K.-F. Hesse, M. Czank, **Á. Nemcsics**: Crystal structure of cadmium germanium selenide, Cd<sub>4</sub>GeSe<sub>6</sub>; Zeitschrift für Kristallographie 216 (2001) pp 39-40
- [C11] M. Serényi, **Á. Nemcsics**, J. Betko, Zs. Zolnai, N. Q. Khanh, Zs. J. Horváth: Sputtered a-SiGe:H layers for solar cell purposes; Book of extended abstract of The Workshop on Solid State Surfaces and Interfaces II (SSSI-II) June 20-22, 2001 Bratislava, Slovakia (2001) p 65
- [C12] P. Turmezei, **Á. Nemcsics**: Modelling of Cd<sub>4</sub>GeSe<sub>6</sub> Crystal - Electrolyte Junction for Electrochemical Solar Cell Purposes; (MIEL 2002 Nis, Yugoslavia 12-15 May, 2002) Proc. of 23rd Int. Conf. on Microelectronics, Vol 1. pp 369-370
- [C13] R. Srnanek, R. Kinder, D. Donoval, L. Peternai, I. Novotny, J. Geurts, D. S. Mc Phail, R. Chater, **Á. Nemcsics**: Chemical Beveling of Si/SiGe Structures for Structure and Material Analysis by Raman Spectroscopy; (ASDAM 2002 Smolenice Castle, Slovakia, 14-16 Oct. 2002) Proc. of 4th Int. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems pp 195-198

- [C14] **Á. Nemcsics**: Die Solarzellen in dem Umweltschutzprojekt der Technischen Hochschule Budapest; Proc. of XVI. Kandó Konferencia - Hatvan év a műszaki képzésben, 2002 nov. 14-15 CD-n, 7 oldal
- [C15] M. Serényi, J. Betko, **Á. Nemcsics**, N. Q. Khanh, M. Morvic: Fabrication of a-SiGe Structure by Magnetron Sputtering for Solar Cell Purposes; Physica Status Solidi (c) 0 (2003) pp 857-861
- [C16] P. Turmezei, **Á. Nemcsics**: Modelling of Cd<sub>4</sub>GeSe<sub>6</sub>/Electrolyte Junction for Solar Cell Purposes; Physica Status Solidi (c) (2003) pp 967-969
- [C17] S. Kovách, **Á. Nemcsics**, Z. Lábadi, S. Motrya: Investigation of the Electronic Structure of Cd<sub>4</sub>GeSe<sub>6</sub> by Photoelectrochemical and Photoluminescence Methods; Inorganic Materials 39 (2003) pp 108-112
- [C18] **Nemcsics Á.**: A napelem - Napsugárból elektromos áram; Természet Világa 134 (2003) pp 424-426
- [C19] **Nemcsics Á.**: Villamosenergia-termelés napelem segítségével; Elektrotechnika 96. évf. 10. sz. 2003. nov. 270-273. old.
- [C20] **Ákos Nemcsics**: Trends of Progress of Solar Cell Technology; Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Climate Change – Energy Awareness – Energy Efficiency, June 4-6, 2003, Győr, Hungary 223-229. old.
- [C21] I. Iván, I. Szabó, I. Mojzes, S. Kökényesi, **Á. Nemcsics**, M. Suszter. S. Misák S.: Metal diffusion and surface pattern formation on GaAs and As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> semiconductors; Proc. of 26<sup>th</sup> Int. Spring Seminar on Electronics Technology, May 8-11, 2003, High Tatras, Stará Lesná, Slovakia, ISBN 0-7803-8002-9, 2003, p71-73
- [C22] **Á. Nemcsics**: Novel Material for Electrochemical Solar Cell; Proc. of EuroSun2004 14. Intern. Sonnenforum (20-23 June 2004, Freiburg, Germany) Band 2 pp. 831-834
- [C23] **Á. Nemcsics**: Education of solar cell at college of engineering Budapest; Proc. of 2nd Int. Workshop on Teaching in Photovoltaics, 22-23 Apr. 2004, Prague, Czech Rep. Pp 55-58
- [C24] **Á. Nemcsics**, P. Turmezei: Research of electrochemical solar cell at the College of Engineering Budapest; Proc. of 2nd Int. Workshop on Teaching in Photovoltaics, 22-23 Apr. 2004, Prague, Czech Rep. Pp 77-79
- [C25] **Nemcsics Á.**: A napelem - Paradigmaváltás a technológiában; Természet Világa 135 (2004) pp 420-422
- [C26] M. Serényi, J. Betko, **Á. Nemcsics**, N. Q. Khanh, D. K. Basa, M. Morvic: Study on the RF Sputtered hydrogenated amorphous silicon-germanium thin films; Microelectronics Reliability 45 (2005) pp 1252-1256

- [C27] **Á. Nemcsics**, S. Kovács, Z. Lábadi, K.-F. Hesse, M. Czank, P. Turmezei, S. Mortrya: Novel material for purpose of electrochemical solar cell; *Solar Energy Materials and Solar Cells* 89 (2005) pp 175-183
- [C28] Gröller Gy., **Nemcsics Á.**: Polimer alapú színes kijelzők és fényforrások; *Proc. of XXX Kolorisztikai Szimpózium 2005 máj. 30 – jún. 1. Eger* (ISBN 963-9319-44-9) 14 oldal
- [C29] **Nemcsics Á.**: Vékonyrétegekről, nanostruktúrákról a napelem ürügyén; *Fizikai Szemle* 56 2006/9 pp 293-299
- [C30] **Nemcsics Á.** Műanyag napelemek; *Élet és Tudomány* 2006/39 pp 1237-1239
- [C31] M. Serényi, T. Lohner, Z. Zolnai, P. Petrik, **Á. Nemcsics**, N. Q. Khanh, P. Turmezei: Studies on the RF Sputtered Amorphous SiGe Thin Films; *Inorganic Materials* 42 (2006) pp 3-6
- [C32] Á. Németh, V. Rakovics, Z. Lábadi, **Á. Nemcsics**, A. L. Tóth, I. Bársony: Study of the properties of sulphide buffer layers as a function of deposition parameters and annealing; *Proc. of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 4-8 September 2006, Dresden, Germany*; pp 1986-1989
- [C33] **Ákos Nemcsics**: Über dünne Schichten und Nanostrukturen anhand von Solarzellen; *Proc. of Conference on New Aspects in the Innovation of a traditional Industry (35 Years of Higher Education and Research in the Light Industry)* (ed. by I. Patkó) ISBN 978-963-7154-66-9, Nov. 19. 2007 Budapest, BMF pp 247-256
- [C34] P. Basa, G. Molnár, A. A. Koós, L. Dózsa, **Á. Nemcsics**, Zs. J. Horváth, P. M. Gorley, V. P. Makhniy, S. V. Bilichuk, V. M. Frasnuyak, P. P. Horley: Formation of Ge nanocrystals by electron beam evaporation; *Proc. of the Int Conf Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, NANOMEETING-2007* (eds. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin) World Scientific ISBN-13 978-981-270-599-0, ISBN-10 981-270-599-6; pp 431-434
- [C35] T. Lohner, M. Serényi, D. K. Basa, N. Q. Khánh, **Á. Nemcsics**, P. Petrik, P. Turmezei: Composition and Thickness of RF Sputtered Amorphous Silicon Alloy Films; *Acta Polytechnica Hungarica* 5 (2008) pp 23-30
- [C36] **Á. Nemcsics**, P. Turmezei, Z. Balázs: Selections from the solar cell connected education and research at the Budapest Tech; *proc. of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conf. 1-5 Sept. 2008, Valencia, Spain* ISBN 3-936338-24-8 pp 3768-3770
- [C37] P. Basa, G. Molnár, L. Dobos, B. Pécz, L. Tóth, A. L. Tóth, A. A. Koós L. Dózsa, **Á. Nemcsics**, Zs. J. Horváth: Formation of Ge nanocrystals in SiO<sub>2</sub> by electron beam evaporation; *J. of Nanoscience and Naotechnology* 8 (2008) 818-822
- [C38] **Á. Nemcsics**, P. Turmezei, Z. Balázs: Chapters from the solar cell related education and research at the BMF-MTI; *Proc of 4th Int. Workshop on Teaching in Photovoltaics, 27-28 March 2008, Prague, Czech Rep* ISBN 978-80-01-04047-8 (Ed. V. Benda). pp 111-114



- [C39] Berkó T., Réti I., Lábadi Z., Szentpáli B., **Nemcsics Á.**, Püspöki S., Németh Á., Turmezei P.: Napelemmodulok hiteles mérésének mérés technikai problémái napszimulátorban; *Konf. Kiadvány XXIV Nemzetközi Kandó Konferencia 2008 (110 év a műszaki képzés és kutatás szolgálatában) 2008. nov. 6-7. Budapest (ISBN 978-963-7154-74-4) CD-n pp 2 old*
- [C40] **Á. Nemcsics**: Bericht über die Bildung und Forschung für Solarzellen an der Technischen Hochschule Budapest; *Konf. Kiadvány XXIV Nemzetközi Kandó Konferencia 2008 (110 év a műszaki képzés és kutatás szolgálatában) 2008. nov. 6-7. Budapest (ISBN 978-963-7154-74-4) CD-n pp 9 old*
- [C41] **Nemcsics Á.**, Gröller Gy., Turmezei P.: A polimer alapú napelemek; *Elektrotechnika* 6 (2008) pp 18-19
- [C42] Berkó Tamás, Réti István, Szentpáli Béla, **Nemcsics Ákos**, Püspöki Sándor, Németh Ágoston, Turmezei Péter: Napelemmodulok napszimulátoros minősítésének mérés technikai problémái; *Elektronikai Technológia, Mikrotechnika* 48 2009/1 pp 36-38
- [C43] **Nemcsics Ákos**: Új irányok a napelemes technológiában; *Elektronikai Technológia, Mikrotechnika* 48 2009/1 pp 39-45
- [C44] A. Csík, M. Serényi, Z. Erdélyi, **Á. Nemcsics**, C. Cserháti, G. A. Langer, D. L. Beke, C. Frigeri, A. Simon: Investigation of thermal stability of hydrogenated amorphous Si/Ge multilayers; *Vacuum* 84 (2010) 137-140
- [C45] M-N. Chang, Y-H. Ku, P-L. Chen, J. Su, M. Li, **Á. Nemcsics**: High-aspect-ratio carbon nano-rod tips carried out from scanning electron beam deposition; *Ext. Abstr. of 24th Microprocesses and Nanotechnology Conference, Oct. 24-27 2011 Kyoto, Japan, 26P-7-71* pp 1-2

### **A csatlakozó nemzetközi szakirodalom legfontosabb publikációi**

- B.A. Joyce; in. *Two-dimensional systems: Physics and New Devices* (eds.: G. Bauer, F. Kucher, H. Heinrich) Springer Verlag, Heidelberg (1986)
- C. S. Lent, P. I. Cohen; *Surface Science* 139 (1984) 121
- P. J. Dobson, B. A. Joyce, J. H. Neave, J. Zhang; *J. Crystal Growth* 81 (1987) 1
- S. Clarke, D. D. Vvedensky; *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2235
- L.-M. Peng, M. J. Whelan; *Surface Science* 238 (1990) L446
- N. Grandejan, J. Massies; *J. Crystal Growth* 134 (1993) 51
- N. Koguchi, S. Takahashi, T. Chikyow; *J. Crystal Growth* 111 (1991) 688
- K. Watanabe, N. Koguchi, Y. Gotoh; *Jpn. J. Applied Physics* 39 (2000) L79
- J. S. Kim, N. Koguchi; *Applied Physics Letters* 85 (2004) 5893

dc\_238\_11

T. Kuroda, T. Mano, T. Ochiai, S. Sanguinetti, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi; Phys. Rev. B  
72 (2005) 205301