

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek

Doktori értekezés tézisei

Réti István

Gödöllő 2015

A doktori iskola	
megnevezése:	Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:	Agrárműszaki tudományok
vezetője:	Prof. Dr. Farkas István egyetemi tanár, DSc SZIE, Gépészmérnöki Kar
témavezető:	Prof. Dr. Farkas István egyetemi tanár, DSc
	SZIE, Gépészmérnöki Kar, Környezetipari Rendszerek Intézet

az iskolavezető jóváhagyása

a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JE	ELÖLÉSEK JEGYZÉKE	4
R	ÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	4
1.	BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	5
2.	ANYAG ÉS MÓDSZER	6
	2.1. Folyadékfázisú epitaxia	6
	2.2. Molekulasugár-epitaxiás berendezés	6
	2.3. Precíziós mozgatások finommechanikai módszerei ultravákuumban.	7
	2.4. Ultra nagy vákuum előállítása és mérése	8
	2.5. MBE berendezéssel napelemek számára növesztett rétegek mérései	9
	2.6. Napelemek optikai minősítése és a műnap	10
3.	EREDMÉNYEK	12
	3.1. Optikai minősítő módszer a napelem gyártás fázisaira	12
	3.2. Módszer széles spektrumú diódás sugárzás létrehozására	14
	3.3. Módszer InGaAs fényelem érzékenységi spektrumának szélesítésére.	
	3.4. Eljárás a napelem pillanatnyi hatásfokának meghatározásához	18
	3.5. Modell az új félvezető fajta kialakításához	20
	3.6. Molekulaáramot szabályozó algoritmus	22
	3.7. Eredmények értékelése	24
4.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	25
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	
6.	ÖSSZEFOGLALÁS	27

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

- Eav: átlagos megvilágítási érték [lux]
- Eg: az anyagra jellemző tiltott sávszélesség [eV]
- E_{max}: maximális megvilágítási érték [lux]
- *P*: a napelemből kivehető pillanatnyi teljesítmény [W]
- *P*_{foto}: beeső fényteljesítmény[W]
- *T*: hőmérséklet [°K]
- U: a napelem pillanatnyi feszültsége [V]
- $U_{\ddot{u}}$: üresjárati feszültség [V]
- $V(\lambda)$: a világosban látó átlagos emberi szem spektrális érzékenységi görbéje [-]
- η : a napelem optikai hatásfoka [%]

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

CIS:	Copper Indium Selenide (CuInSe ₂) – réz-indium-diszelenid napelem technológia					
CIGS:	Copper Indium Gallium Selenide (CuInGaSe ₂) – réz-indium-gallium-diszelenid napelem technológia					
GaAs:	Gallium Arsenide – gallium-arzenid					
InGaAs:	Indium Gallium Arsenide – indium-gallium-arzenid					
InP:	Indium Phosphide – indium-foszfid					
LED:	Light-Emitting-Diode – fénykibocsátó dióda					
LPE:	Liquid Phase Epitaxy – folyadékfázisú epitaxia					
MBE:	Molecular Beam Epitaxy – molekulasugár-epitaxia					
PLC:	Programmable Logical Controller – programozható logikai vezérlő					
RHEED:	Reflection High Energy Electron Diffraction – nagyfeszültségű súrolószögű elektron diffrakció					
UHV:	Ultra-High Vacuum – ultra nagy vákuum					
ZnO:	Zinc Oxide – cink-oxid					

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A mai társadalom létkérdése, hogy az erőltetett folyamatos gazdasági növekedéssel járó energiafogyasztást miként tudja a korábbiaknál kevésbé környezetszennyező energiaforrásokkal kielégíteni.

A már meglévő energia átalakítási megoldásokon túl szükség van újabb, az eddigieknél nagyobb és jobb hatásfokkal üzemelő eszközökre, berendezésekre.

Egyik lehetőség az olyan új heteroszerkezetű félvezetők kimunkálása, amelyek az eddigieknél jobb hatásfokkal alakítják át a villamos energiát közvetlenül fény energiává, illetve a napsugárzást villamos energiává.

Munkám célkitűzései pontokba szedve az alábbiak.

- 1. Optikai minősítő módszer kidolgozása, amellyel nem csupán egy kérdéses napelem típust lehet minősíteni, hanem a vegyület félvezető napelem hatásfokán is lehet javítani azáltal, hogy a gyártási folyamat egyes közbülső fázistermékeit lehet vele tesztelni és összevetni az elméleti számítással, ezáltal irányadatokat szolgáltatva a hatékonyabb gyártás érdekében.
- 2. Módszer kidolgozása, ami több speciális LED félvezetőből teremti meg az alapot a széles spektrumtartományban történő energia átalakításnak, valamint alapul szolgál majd a nagy hatásfokú detektorok, illetve napelemek kimunkálásában is.
- 3. Eljárás kidolgozása, amely a speciális LED félvezetőkből kialakított széles spektrumtartományban dolgozó energia átalakítást felhasználva olyan fényelemként is működő félvezető eszköz előállítását segíti, mely energiaátalakítása nagy hatásfok mellett széles hullámhossztartrományban közel egyenletesen valósul meg.
- 4. Eljárás kidolgozása, melynek segítségével olyan speciális detektor hozható létre, ami a szem érzékenységének pontos leutánzása révén bármely típusú napelem pillanatnyi hatásfoka meghatározható, valamint a műnapok homogenitása javítható.
- 5. Egy optimális, új félvezetőfajta kialakításához szükséges rendszertípus modelljének felállítása. Ehhez kapcsolódóan szimulációk alapján eljárás kidolgozása, melynek segítségével nagy biztonsággal lehet új típusú napelem mintákat párologtatni nem csupán laboratóriumi körülmények között, hanem ipari környezetben is.
- 6. Új, számítógéppel vezérelhető blendeszabályzási algoritmus készítése párologtató források (Knudsen cellák) kilépő nyílásai részére, amellyel a kísérleti mintákra érkező molekulák száma kézben tartható.

Az elvégzendő feladatok révén az új félvezető előállítására vonatkozó megállapításokkal irányt kívánok mutatni a korszerű mérnöki feladatok megvalósíthatóságára is.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a pontban mutatom be azokat az eszközöket és módszereket, amelyek segítségével a kitűzött feladatok megoldására sor került. Az új nagy hatásfokú félvezető alapú napelem kifejlesztéséhez vezető utam a jó hatásfokú heteroszerkezetes fényemittáló eszközökön át vezetett.

2.1. Folyadékfázisú epitaxia

Az epitaxiás módszerek közül a folyadékfázisú epitaxia a legelterjedtebb, ha a cél egy kevésbé bonyolult heteroszerkezet gyors és költségtakarékos kifejlesztése, majd gyártása. A költségkímélést elősegíti, ha a tervezett rétegszerkezet alapja a kereskedelemben kapható egykristályos hordozó. A gyorsabb célbaérést pedig az segíti, ha a tervezett félvezető anyagrendszer a hordozóéval közel azonos rácsállandóval rendelkezik.

A félvezető minták növesztése, amikkel vizsgálataimat végeztem úgy történt, hogy a folyadékfázisú epitaxia során az egykristályos hordozóra az egykristályos réteg magas hőmérsékleten (InGaAsP ~ 600°C) telített oldatból lett leválasztva.

A hevítőkályhának a reaktor cső mentén nagy figyelmet igénylő mozgatásával vált hangolhatóvá az aktív réteg vastagsága és általa a működési hullámhossz is.

Ezt a hangolási lehetőséget ragadom meg dolgozatom fő céljának, a félvezetőkkel történő széles sávú energia átalakításnak megvalósításakor.

2.2. Molekulasugár-epitaxiás berendezés

A GaAs-alapú napelem struktúrák létrehozásának fontos feltétele a félvezetőkristályrétegek és nanoszerkezetek kontrollált növesztése. Ezek a néhány atomsor vastag rétegek, illetve más nanoméretű objektumok elsősorban molekulasugárepitaxiával növeszthetők a következő előnyök miatt:

- Az alacsony leválasztási hőmérséklet nem hoz létre hibahelyeket.
- Csökkenti a rétegek közötti diffúzió lehetőségét.
- A rétegek növesztése jól kontrollálhatóan, alacsony sebességgel történhet (0.1-1 atomsor/s) és folyamat közben bármikor leállítható.
- Az anyag összetétele, adalékolása jól változtatható a Knudsen-cellák hőmérsékletének változtatásával.
- A szuperrácsok igen pontosan állíthatók elő vele.
- Alkalmazásával drága litográfiás eljárások nélkül is kettő, egy és nulladimenziós nanostruktúrákat készíthetünk.

Az MBE berendezéseket a rétegnövesztés irányítottságának megfelelően manapság horizontális elrendezésben építik. Ugyanakkor elterjedt még a minta kezelhetőségét tekintve bonyolultabb, de a rétegnövesztés szempontjából klasszikus vertikális forma is, amelyet a korábbi LED gyártás során szerzett tapasztalatok alapján előnybe részesítettem. Ez látható a 2.1. ábrán.



2.1. ábra. A rétegnövesztést vertikálisan végző MBE berendezésének felépítése

A 2.1. ábrán látható berendezés három fő részből áll:

- Zsilipkamra a kísérleti minták mozgatásával járó háttérszennyezések minimalizálására.
- Főkamra, más néven reaktorkama, ahol a rétegleválasztás, vagy az egyéb struktúranövesztés történik, atom- illetve molekulasugarak segítségével. Ezeket a műveleteket már nagyvákuumban (10⁻¹⁰ mbar) szükséges végezni, hogy a részecskék szabadúthossza nagy legyen.
- A mellék kamra leginkább a többféle vákuumszivattyúk (turbó molekuláris szivattyú, ion-getter, Titán szublimátor) csatlakoztatására szolgál.

A berendezés segítségével nagyon pontosan meghatározhattam, hogy milyen heteroszerkezetekkel érdemes, lehet, illetve szükséges foglalkoznom.

2.3. Precíziós mozgatások finommechanikai módszerei ultravákuumban

Az ultravákuum térben történő mozgatás számos olyan tervezési eltérést kíván, ami a nagy tisztaság megtartása érdekében jelentősen el kell térjen a hétköznapokra kifejlesztett megoldásoktól. Szigorúan tiltott az olyan anyagoknak a tiszta térben használata, amelyek szublimálhatnak, vagy bármilyen szennyező anyagot magukkal vihetnek.

Mivel az MBE berendezéseknél különösen nagy az UHV igény, ezért az egyik legnagyobb körültekintést igénylő feladatot a szelet és tartójának mozgatása jelenti. A feladat megoldásait tárgyalom ebben a fejezetben.

Kis elmozdulással járó mozgatások ultravákuumban

Több gyártó is specializálódott arra, hogy vákuumtömör mozgatókat készít alapmozgásokra. A tiszta teret igénylő párologtatóknál a többdimenziós mozgások megvalósítását többnyire ezen alapelemek kombinációjával oldják meg. Ebben az esetben csupán az összeépítés tömítéseire kellett nagy gondot fordítanom.

Egyes nagy bonyolultságú rendszereknél, mint az MBE, kikerülhetetlenné vált olyan speciális eszköz összeállítása, amellyel a mintatartó esetében például öt szabadságfokú mozgást is meg kellett tudjak valósítani.

Ennek az eszköznek a sajátossága, hogy az UHV szempontjából kritikus térbe, a főkamrába csupán a félvezető szelet tartó lóg be egy mozgató rúd végén. A rudat a vákuumtömörség érdekében egy rugalmas cső zárja el a külvilágtól, ahonnan már a cső által megszabott korlátok között a rúd kívülről mozgatható. A feladat összetettsége miatt a kész alapelemek összeépítése után is még maradt egyedi gyártásra rászoruló elem.

Ez a molibdénből készült fűthető mintatartó volt. Neki nem csupán a minta 500 ⁰C hőmérsékletre fűtését kellett UHV szennyezés nélkül követnie, hanem a hőmozgás ellenére a vele kapcsolódó elemekkel is tartania kellett a mechanikai illesztettséget.

Nagy elmozdulással járó mozgatások ultravákuumban

Az ultravákuumban történő nagy elmozdulással, nem ritkán egy méteres elmozdulással járó mozgatások több esetben nem direkt, hanem áttételes módon történnek. A leginkább elterjedt áttételes módszer, amelyet én is előnyben részesítettem a megbízhatósága miatt, a vákuumban lévő mozgatandó eszközre egy hermetikusan becsomagolt erős állandó mágnes van szerelve, amit kívülről egy másik mágnes segítségével a kívánt irányokba lehet elmozdítani.

Minden új anyag zsilipelésénél fontos kritérium még, hogy a nagy vákuumigény miatt nem maradhat a munkatérben semmilyen szelettovábbító eszköz. Ezért biztosítanom kellett az eszköz felépítésénél, hogy egy jelzőrendszer erre külön odafigyeljen.

2.4. Ultra nagy vákuum előállítása és mérése

A feladatom megoldása során a szivattyúk kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy a főkamrában folyó folyamatok tiszta terét minél nagyobb szívási teljesítménnyel biztosítsuk, ezért a lehetséges szivattyúk közül a választás a rotációs, turbómolekuláris, valamint szorpciós szivattyúkra esett.

Ultra nagy vákuum előállítása MBE rendszereknél

Az MBE rendszereknél az ultra nagy vákuum előállítása több lépcsőben történik. Az első lépcsőben elő vákuumot hoznak létre (10^{-4} mbar), amit rotációs szivattyúval oldottam meg. Mivel ennek kenőanyaga olaj, ezért egy biztonsági szeleppel gondoskodnom kellett arról, hogy ez az olaj feszültség kimaradás esetén ne juthasson be a szívott térbe. A nagy vákuum második szintjét ($10^{-8} - 10^{-10}$ mbar) a rotációs szivattyúval sorba kapcsolt turbómolekuláris szivattyúval értem el.

Az MBE-nél azonban még ez az érték sem elegendő, ezért a maradék gázokat harmadik lépcsőként általában megkötik. Ennek megoldására a mellékkamrára csatlakoztatható Titán-szublimációs szivattyút alkalmaztam, melynek alapelve az, hogy a vákuumtérben maradó gázmolekulák nagyfeszültség (5kV) és mágneses tér (0.1 - 0.3 Tesla) segítségével ionizálódnak, majd a felgyorsított ionok a megkötő anyagból készült felületbe csapódva kötésben maradnak. Ennek a megkötő folyamatnak előnye, hogy már 10^{-4} mbar-tól működik és végvákuumuk elérheti a 10^{-11} mbar értéket.

Ultra nagy vákuum mérése MBE rendszereknél

Az UHV rendszerekben a nyomás mérésére már csupán alacsony nyomástartományokban működő mérőeszközöket alkalmaznak. Ezeknek két fő fajtája van:

- abszolút nyomásmérők (vákuummérők),
- parciális-nyomásmérők (tömegspektrométerek).

A rendszeremhez a nagy bonyolultsága miatt mindkét fajtának beépítését szükségesnek tartottam.

Az abszolút nyomásmérők működési elve egyúttal behatárolja annak mérési tartományát is. A rotációs szivattyúval előállított elővákuumot ellenőrző mérésnél a hővezetésen alapuló 100 mbar és 5×10^{-4} mbar között detektáló Piráni vákuummérőt alkalmaztam. A főkamrában viszont a nagyobb vákuum igény miatt már egy másik, ionizációs elven alapuló Penning vákuummérőre volt szükségem, amelynek mérési határa 10^{-12} mbar. Mivel az eszközben kialakított ionizációs áram arányos a nyomással és ez az összefüggés több nagyságrenden keresztül lineáris, így a főkamrának vákuum szempontjából kritikus terének felügyeleti biztonsága is szavatolva van.

Parciális-nyomásmérő MBE rendszerbe építését azért tartottam szükségesnek, mert a vákuummérők csak az össznyomást mérik. Számos esetben, mint a mi kísérleti összeállításunknál is fontos volt a különféle gázok parciális nyomásainak, a maradékgáz összetevőinek ismerete, hogy milyen további molekulákkal számoljunk a betervezetthez képest. A felhasznált kvadrupol tömegspektrométer az adott gáz ionjait az elektromágneses térrel való kölcsönhatás során tömeg/töltés hányadosuk alapján választotta szét. A mérés során a rendszerben lévő maradékgáz tömegspektrumát tudtam megvizsgálni azáltal, hogy az eszköz a relatív intenzitást ábrázolta a tömeg/töltés, vagy tömeg/rendszám hányados függvényében.

2.5. MBE berendezéssel napelemek számára növesztett rétegek mérései

Az MBE berendezéssel növesztett rétegek, mint vékony rétegek vizsgálatára főleg új anyagok bevezetése esetén számos módszer ismert (*Brümmer et. al., 1984*). Ezen módszerek összességét pazarlás lenne alkalmazni, ezért jelen esetben azokat veszem számba, amelyeket a munkámhoz a TTK-MFA keretein belül alkalmazni tudtam.

Ellipszometria

Az ellipszometria egy olyan nagy érzékenységű roncsolás mentes optikai elven történő vizsgálat, amellyel első sorban felületeket, illetve vékonyrétegszerkezeteket tudtam minősíteni ultravákuumban is. Abban az esetben, amikor ismert volt az anyag dielektromos adata is, akkor meg tudtam határozni a mintán lévő vékonyréteg vastagságát, szemcseszerkezetét, határfelületeinek minőségét. A kapott adatok megnyugtató ellenőrzésül szolgáltak a létrehozott ZnO réteg vizsgálatánál, ugyanakkor biztos hátteret jelentenek az új napelem kísérleti rétegeinek ellenőrzés sorozatánál.

Rutherford-visszaszórásos Spektrometria

A Rutherford-visszaszórásos Spektrometria (RBS) során 1-5 MeV-os felgyorsított He ionokkal történt a vizsgált minta szelet bombázása és azok a szelet atomjairól az őket jellemző számban és energiával verődtek vissza. A rugalmasan visszaverődött He ionok energiáját detektálva a minta atomjainak fajtáját, a fajtához azonos energianívón érkező ionok számából pedig azok koncentrációját tudtam meghatározni. Amennyiben a He ionok beesési szögét változtattuk, akkor a mintában megtett hosszabb úttal arányos energiavesztésből meg tudtam határozni a kísérleti réteg vastagságát és összevethettem az ellipszométerrel mért értékkel.

Pásztázó elektronmikroszkópia

A pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) volt az a harmadik vizsgálat, ami segített dönteni, sőt az eltéréseket is megmagyarázni, ha az ellipszométeres, illetve RBS összehasonlító mérésnél rétegvastagságbeli eltéréseket tapasztaltam.

A kísérleti minta felülete egy elektronágyú fókuszált sugarával lett végigpásztázva. A visszaszórt elektronokat és röntgensugarakat különböző detektorokkal érzékelve, majd hozzárendelve az elektronok becsapódási helyeinek koordinátáit, egy jól használható néhány nm felbontású képet kaphattam a felső réteg szemcseszerkezetéről, szennyezők helyéről, mennyiségéről és a számomra fontos réteg vastagságáról.

2.6. Napelemek optikai minősítése és a műnap

Ahogy az energia szűkösség az Európai Unióban is megnövelte a keresletet a napelemekre, úgy szigorították a kezdeti amerikai előírásokat a gyártási minőség javítása érdekében.

Műnap halogén izzókkal

A műnap eredeti célja, hogy valamilyen szinten leutánozza a Nap sugárzását mesterséges körülmények között. Összevetve a Nap WMO által az atmoszférikus térben mért sugárzását különböző hőmérsékletű fekete testek sugárzásával, a legkisebb eltérést az 5800 ⁰K hőmérsékletű adta.

Eddigi mérési tapasztalataim alapján ilyen színhőmérsékletet és spektrális jelleggörbét legjobban halogén izzólámpákkal lehetett megközelíteni. A közelítés felülvizsgálatára az MTA MFA keretein belül egy megvilágító síkra sűrű

mátrixban elhelyezett több kicsi izzólámpából felépített műnapnál volt lehetőségem. Ezt a műnapot az Energy Equipment Testing Service Ltd. cég készítette eredetileg Philips 3000 ⁰K színhőmérsékleten sugárzó hidegtükrös lámpákkal. Látványos lett az eredmény, amikor a Philips lámpákat magasabb színhőmérsékleten sugárzó Solux 4700 ⁰K hidegtükrös lámpákra cseréltük ki.

Ellenőrző mérésem szerint még a két izzólámpafajta sugárzási kúpszögének különbségéből adódó inhomogenitást is sikerült kiküszöbölni egy kis abszorpciójú, jó fényszóró képességű fólia beépítésével.

A műnap minőségi javítása egy 1500 x 750 mm nagyságú napelem vizsgálatára jól alkalmazható megoldáshoz vezetett.

A napelem tesztparamétereinek felvételével párhuzamosan szükséges még mérni annak felhevülési hőmérsékletét is és a kapott paraméter adatokat meg kell szorozni a hozzá tartozó hőfoknak megfelelő korrekciós tényezővel, amit a napelem tartóra szerelt referencia fényelemmel egy akreditált laboratóriumban kimértek.

Műnap xenon lámpával

Az olyan laboratóriumokban, ahol kisebb felületű kísérleti napelemek tesztelése is cél, jól használhatók azok a napszimulátorok, amelyekbe fényforrásként kevesebb hőt kibocsátó, de ugyanakkor nagy fényerejű xenon lámpákat építenek be.

Ez esetben nem szabad megfeledkeznünk a sugárzás spektrális képében megjelenő xenonra jellemző kiemelkedésekről.

Műnap alternatívák

A napelemek előállítása során felmerült az igény egy olyan gyorsteszt lehetőségre, amit a gyártósorba be lehet illeszteni, hogy minden elkészült darabról egy jó közelítéses információt adjon. Erre a legutóbbi időkig a legjobban bevált megoldás a villanócsöves megvilágító. Spektruma a xenon lámpához hasonló eltéréseket mutat a valódi napsugárzáshoz képest, viszont csak néhány ezredmásodperc időtartamra, ami a kezdeti NASA előírásoknak megfelel, de már a mai európai elvárásoknak nem.

Az utóbbi években egy sokkal ígéretesebb alternatíva jelent meg a piacon éspedig félvezető diódákból. Az MBE elterjedésének köszönhetően annyira kifinomult a kék LED gyártási technológiája, hogy különböző fénypor keverékeket a kék LED elé ragasztásával az emberi szemet már jól elkápráztató fehér fény állítható elő. Ez a többnyire három markáns spektrumcsúccsal rendelkező sugárzás viszont még nem elegendő egy jó napszimulátorhoz. Jobb közelítést hozott és a távlatokban a technológia fejlődése által több lehetőséget is ígér a színházi reflektoroknál már bevált színkeveréses kísérleti sugárzó, amelyekben a három féle színű LED-ek meghajtó áramköreit a televíziózásnál már megszokott RGB jelekkel vezéreltük. Ez esetben egy diffúzort kellett beépítsünk a szükséges homogenitás érdekében, valamint egy gyűjtőlencsét is, amivel csupán 10 mm átmérőjű felületen tudtuk csak elérni az előírt besugárzási teljesítményt a rendelkezésre álló LED elemekkel.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a pontban bemutatom azokat az eredményeket, melyekkel világító félvezetők energiaátalakítási sikereiből kiindulva dolgoztam ki olyan nagy hatásfokú kiszélesített spektrumtartományban működő napelem típusnak gyártási módszerét, amely az elkészítési fázisokban is kontrollálható módon egy MBE felhasználásával készülhet.

3.1. Optikai minősítő módszer a napelem gyártás fázisaira

Az új optikai minősítő módszeremmel egyrészt a homlokoldali vezető réteggel ellátott ablak transzmissziója mérhető ki még összeépítés előtti állapotban, másrészt egy igen fontos kiértékelésre képes, mert nemzetközileg hitelesített pontosságú képet tud adni az újonnan kialakított félvezető együttes spektrális érzékenységéről.

A bevezetett új módszerem alapjául egy Cary spektroradiométer szolgált, amit a cél érdekében alakítottam át és annak megfelelő technikai eszközökkel bővítettem ki.

A pontosságot garantálja a módszer lényege, hogy a mérési ciklus során minden egyes mérési pont értéke összevetésre kerül az Országos Mérésügyi Hivatalban bekalibrált etalon detektor mért értékével (3.1. ábra).



3.1. ábra. A napelem minta mérésének blokkvázlata

A halogén lámpa fénye egy spektroradiométer belépő résére van leképezve. A kilépő rés után a vezérelt fényzár a detektorok sötétáramát küszöböli ki. A továbbjutó lencse által párhuzamosított fénysugarat egy fényosztó egymásra merőleges irányokra osztotta: a sugárzás egyik fele a vizsgálandó napelem mintára irányult, míg a megtört irány (5%) az etalon detektorra. Az etalon detektor ismert érzékenységi adatai által kiküszöbölhető egyrészt a fényforrás időbeli változásából eredő bizonytalanság, másrészt a monokromátor nem lineáris hullámhossz felbontásából származó hiba.

A vezérelt mérési ciklusok befejezése után a feldolgozó algoritmus összeveti a mért értékből adódó mátrixot a referencia értékekkel és ezután rajzolja ki a vizsgált napelem minta 3.2. ábrán látható spektrális görbéjét.



3.2. ábra. Egy mérési sorozat eredménye

A 3.3. ábra már egy olyan mérési összeállítást mutat, ahol a módszerem segítségével egyértelműen optimalizálható a CIS napelem ZnO homlokoldali vezető rétegének (w < 1 μ m) vastagsága még összeépítés előtt.



3.3. ábra. A ZnO minta mérésének blokkvázlata

Az üveghordozóra feljuttatott ZnO bevonat a napelemet tekintve annak optikai szűrőjeként funkcionál, így a napelem minta mérési összeállítását az alábbiak szerint módosítottam.

A fényzáron továbbjutó, a lencse által párhuzamosított fénysugár útjába a fényosztó helyett egy szűrőtartó került elhelyezésre a vizsgálandó rétegek számára. A rajta átjutó fényt pedig az ismert érzékenységi karakterisztikájú etalon fogadja. A vezérelt mérési ciklus befejezése után a feldolgozó algoritmus összeveti a mért értékből adódó mátrixot a referencia értékekkel és ezután rajzolja ki a vizsgált minta 3.4. ábrán látható spektrális görbéjét, amiből a napelem pillanatnyi munkafázisa értékelhető.



3.4. ábra. CIS napelem gyártás ZnO vastagság beállítási fázisai

A bemutatott gyakorlati eredmények igazolják, hogy a módszer segítségével jelentősen megnövelhető a napelem előállítás kihozatali hatásfoka, valamint jó támpontként szolgál az új típusú napelem kifejlesztésében is.

3.2. Módszer széles spektrumú diódás sugárzás létrehozására

A több hullámhosszon sugárzó LED előállítását az a felismerés segítette, hogy a háromkomponensű anyagok tiltott sávja és rácsállandója közötti egyértelmű összefüggéssel ellentétben a négykomponensű anyagoknál, mint a GaInAsP-nél is a rácsállandó és a tiltott sáv szélessége egymástól függetlenül változtatható az összetevők arányának megváltoztatásával.



3.5. ábra. InGaAsP/InP félvezető LED felépítése

A 3.5. ábrán látható módon az InP hordozóra egy vele azonos típusú InP réteg (3-4 μ m), majd InGaAsP aktív réteg (1-2 μ m) és zárásul egy a hordozóval ellentétes típusú InP réteg készült (6-10 μ m) gyorsasága és olcsósága miatt folyadékfázisú epitaxiás (LPE) eljárással.

Nagyon lényeges volt a kontaktus rétegek kialakítása A szelet *p* oldalán Au-Zn / Cr / Au, viszont az *n* oldalán, ahol a fény kijön és emiatt a legkevésbé akadályozó 25 μ m vastag arany huzallal kötöttem ki MECH-EL 907 bondolóval egy TO 18 tokra, Au-Sn / Au vezető réteg bizonyult a legjobbnak (3.6. ábra).



3.6. ábra. TO 18 tokra kiszerelt LED epoxi nélkül (bal) és epoxi bevonattal (jobb)

A 3.6. ábra jobb oldala már egy olyan LED-et mutat, amelyet kiszerelés után átlátszó epoxi réteggel vontam be. Az epoxi egyrészt stabilizálja az elektromos kikötést, másrész elősegíti a LED-ből kijövő fény jobb optikai leképzését.

Az aktív InGaAsP réteg összetételének változtatásával lett beállítva a diódákból kilépő sugárzás kívánt hullámhossza (3.7. ábra).



3.7. ábra. 9 szisztematikusan felépített InGaAsP/InP LED spektruma

A LED-sor végső összeszerelése előtt kísérletet tettem optikai úton történő hatásfok növelésre (3.8. ábra).



3.8 ábra. Terelőtükör-műgyanta kombinációk hatása a kivehető teljesítményre

Az összehasonlításokhoz a gyorsasága miatt elterjedt 3.9 ábrán látható kis átmérőjű (50 mm) integráló gömbös mérést használtam *(Martin, Réti et al., 1990)*.





A kontroll LED és a kalibrált detektor együttes használatával kiküszöbölhetőek a kisgömb káros reflexióiból származó mérési hibák.

A sorozatmérésből egyértelmű igazolást kaptam arra, hogy miként szereljek ki egy spektrométerben is jól használható LED sort egy jobb fény nyereség érdekében.

3.3. Módszer az InGaAsP detektorok érzékenységi spektrumának szélesítésére

A módszer alapjainak felépítésekor azt a szilárdtest félvezetők energiaátalakításánál tett megálapítást használtam fel, hogy egy LED struktúra ugyanolyan aktív hullámhossz tartományban működő detektorként is alkalmazható (*Rakovics et al., 2003*).

Így a módszer alapját képező speciális "LED" detektort a széles spektrumot kitöltő, több hullámhosszon sugárzó LED előállításából nyert tapasztalatok alapján építettem fel egy az új célnak megfelelően módosított 1650 nm hullámhosszon sugárzó négykomponensű GaInAsP heteroszerkezetű félvezetőből (3.10. ábra).



3.10. ábra. InGaAsP/InP "LED" detektor felépítése

A kiszélesített spektrumú érzékenység kulcsa a három szintes InGaAsP aktív rétegben van elrejtve. A három aktív rétegszint különböző tiltott sávjai 1150 nm, 1270 nm és 1650 nm hullámhosszaknak felelnek meg és azt a szerepet kapták, hogy szélesebb, platós spektrális érzékenységet érjenek el. A gyakorlati problémát a három különböző InGaAsP rétegszint vastagságának meghatározása és kialakítása okozta. Ehhez nyújtottak segítséget a színszűrő rétegekkel elért eredményeim (1. tézis), valamint a LED sor aktív rétegeinek kialakításánál szerzett tapasztalataim (2. tézis).

Már az első kísérleti szeletek nagyon bíztató, kis jel/zaj viszonnyal rendelkező, széles spektrumban érzékeny fényátalakító detektorokként működtek (3.11. ábra).



3.11. ábra. 1650 nm hullámhosszra készített PIN és "LED" detektor spektruma Az optikai hatásfok növelésére a "LED" detektor esetében is kimértem a LEDsornál alkalmazott terelőtükör-műgyanta kombinációkat (3.12. ábra).



3.12. ábra. "LED" detektor elé tett terelőtükör-műgyanta kombinációk hatása 1650 nm hullámhosszon mérve

A "LED" detektor elé tett terelőtükör-műgyanta kombinációk hatásának kiméréséhez ismét a hatékonysága miatt kedvelt 3.9 ábrán látható mérést használtam, csupán a szűrőzőtt kalibrált detektor szerepét a kísérleti "LED" detektorom töltötte be, a kontroll LED (1215 nm) és minta LED (1386 nm) sugárzókat pedig a 3.7. ábra elemeiből vettem.

Az új "LED" detektor gondolkodásmóddal jól látható módon a fényátalakítás témakörébe is átültethetőek mindazon eredmények, amelyek segítségével a LED térhódítása napjainkban megvalósul.

3.4. Eljárás a napelem pillanatnyi hatásfokának meghatározásához

A 3.1. ábra, valamint a 3.3. ábra által szemléltetett optikai minősítő méréseim, valamint az optimalizáló program alkalmazásával készített eszköz együttes felhasználása eredményezte a 3.13. ábrán látható módszert.



3.13. ábra. Napelem modul megvilágításmérővel

A módszer alapeleme egy olyan általam készített nagy pontosságú telepes megvilágításmérő készülék, melynek fényérzékelője egy nagyérzékenységű szilícium fényelem, melyet igen pontosan hozzáigazítottam az emberi szem fényérzékenységi V(λ) görbéjéhez. A mérőeszköznek az Országos Mérésügyi Hivatalban történő hitelesítése után az amerikai sztenderdre visszavezethető pontossága lett.

Az etalonként szolgáló készülék módszertani előnyét az szolgálja, hogy mérőfejének térbeli érzékenysége a 3.14. ábrán látható teszt görbéje szerint ugyanúgy a belépő fénysugár cosinusával arányos, mint a fényelemek többségének átalakítási hatásfoka.



3.14. ábra. V(λ) korrigált mérőfej cos térbeli érzékenységének tesztgörbéje

Az alábbiakban három napelem típus időbeni degradációjának kimérésével bizonyítom be módszerem hatékonyságát. Minden esetben a vizsgálandó napelem szerkezeti síkját meghosszabbítva helyeztem el a Minilux etalont és hasonlítottam össze a pillanatnyilag leadott teljesítményét az Energy Equipment Testing Service Ltd. cég, PVMT 11250 Modul Tester berendezésének mérési adataival.

A műnappal történt mérési eredmények összehasonlítása érdekében minden esetben a napelemek leadott teljesítményét akkor regisztráltam, amikor a Minilux etalon 51,7 kiloluxot mutatott és a napelem hőmérséklete 39 ^oC volt.

Kiindulásként két olyan típusú napelemet vizsgáltam, amelyekre a műnap szimulátor gyártója a készüléket elsődlegesen felkészítette. Az egyik Korax KS 77 típusú egykristályos szilíciumból készúlt, a másik vizsgált típus pedig egy Kyocera gyártmányú KC85GX polikristályos napelem volt.

A kiértékelés teljessége érdekében a természetben végzett mérési sorozatot az egykristályos és polikristályos napelemmel együtt végrehajtottam egy amorf szilícium napelemen is, amelyet mint ismeretlen kísérleti napelemként fogtam fel, ezzel szimulálva egy későbbi ismeretlen GaAs alapú napelemet.

A 3.15. ábrán látható mérési eredményekkel bizonyítottam be, hogy a karakterisztikus különbségek ellenére módszeremmel biztos értékeket kapunk a vizsgált napelemek időbeni degradációjára.



3.15. ábra. Egykristályos, polikristályos és amorf szilícium napelem összehasonlító mérése természetes körülmények között

A kidolgozott módszeremnek leghasznosabb következtetései a 3.15. ábra alapján, hogy a napelemek teljesítményének változásai egyértelműen hozzárendelhetők az idő és időjárás okozta degradációkhoz. Ugyanakkor az is kitűnik, hogy a módszer periódikus használatával az időjárás okozta veszteségek 10%-kal csökkenthetők.

3.5. Modell az új félvezető fajta kialakításához

A szakirodalom széleskörű áttekintésével összegyűjtött információk birtokában a legígéretesebbnek a GaAs-alapú napelem struktúrák létrehozását tartottam, mert a GaAs alapú napelemeknek rendkívül jó az abszorpciós képessége, tilos sávszerkezete eléri az 1,4 eV-ot és hatásfokuk elérheti a 30 %-t.

Az új félvezető kialakításához használatos modell (3.16. ábra) a következőket kellett tudja:

- félvezető alapszelet: GaAs,
- gyártási mód: molekula epitaxiás növesztés,
- gyártási körülmények: ultra nagy vákuum tér (10⁻¹¹ mbar),
- alacsony leválasztási hőmérséklet,
- alacsony sebességű növesztés (0.1-1 atomsor/sec) folyamatos kontroll mellett,
- adalékolás Knudsen-cellák alkalmazásával,
- rétegnövekedés in-situ figyelése 12 keV-os súrolószög elektron diffrakcióval.



3.16. ábra. Az MBE berendezés modellképe

A modell középpontjában a főkamra (reaktorkamra) áll, ahol minden rétegnövesztéssel kapcsolatos művelet zajlik. Ebben a térben kell biztosítani a legjobb vákuumot. (10⁻¹¹ mbar).

A rétegnövesztés legkritikusabb eseménye a részecskesugarak mintára szabályozott módon történő kibocsátása. Erre a műveletre a rendszerbe négy (Ga, As, In, Al) speciálisan ezt a célt szolgáló effúziós (más néven Knudsen) cellát választottam ki hagyományos vertikális irányítottsággal.

A főkamrának fontos része egy nagyfeszültségű súrolószögű elektron diffrakció (RHEED), amelynél egy közel 30 keV energiájú elektronnyaláb van fókuszálva az új napelem minta felületére kisebb, mint 4° beesési szöggel. Segítségével a nanostruktúrák mintán történő képződése in-situ módon vizsgálható. Mindehhez az elektron ágyúval ellentétes oldalon egy foszforral bevont fluoreszcens képernyő is tartozik a nanostruktúrák RHEED mintázatának megjelenítésére.

Ahhoz, hogy ez a precíz detektálás megvalósulhasson, a minta síkját a RHEED elektron sugár irányának megfelelően optikailag pontosan be kell tudni állítani. Erre a célra egy speciális három irányba mozgatható és el is forgatható manipulátor betervezésére volt szükség, amely a vákuumkamrán kívül kezelhető.

Az új elven működő mintatartó kidolgozását bonyolította, hogy a minta a nagy tisztaságú munkatérre való tekintettel egy cserélhető mintatartón kell legyen rögzítve, amelyet mintáról mintára le és fel kell tudni rögzíteni a speciális mozgatóra.

A célba találáshoz egy olyan 3.17. ábrán látható molibdén alapanyagú papucsot kellett kialkítani, amely a három oldali ékes kialakítása révén megkönnyíti a végső irányba állást az ellentett formájú idomban.



3.17. ábra. A mintatartó mozgatható és fogadó egysége

Az MBE technológiai rendszerében technikai újdonságként alkalmaztam egy spirálrugóval előfeszített csúszóvilla bajonett-foglalathoz hasonlóan kapcsolatát a 3.17. ábrán látható t-alakzatban végződő menetes szárhoz. Ezzel a megoldással biztosítom a mintatartó leesés mentes hordozását és végső helyzetekbe rögzítését.

Hasonló kritikus probléma volt a mindenkori kísérleti szelet oldható kötésének kigondolása is, ami el kell viselje a transzportáláskor fellépő véletlenszerű rázkódásokat, valamint a párologtatáskor fellépő hőmozgást, ugyanakkor biztosítani kell a minta és tartója közötti jó hőátadást. Indium laboratóriumokban bevált alkalmazása mellett az MBE technológiában újdonságként a 3.17. ábrán látható rugós megfogást dolgoztam ki és alkalmaztam.

3.6. Molekulaáramot szabályozó algoritmus

A molekulasugár epitaxiával történő új félvezető építésnek egyik nagyon fontos és kritikus kérdése, hogy miként sikerül a molekulák beépülésének folyamat közbeni (in-situ) mérését és vele párhuzamosan a molekulaáram szabályzását összehangolni. Ennek érdekében kidolgoztam egy új, számítógéppel vezérelhető blendeszabályzó algoritmust, amely az új félvezető fajtát előállító párologtató források (Knudsen cellák) kilépő nyílásait szabályozza. Ez oly módon történik, hogy a kísérleti mintákra érkező molekulák rétegépülési periódusát, a RHEED fluoreszcens képernyőjén egy képfeldolgozót kiszolgáló kamerával figyeltetem. A képfeldolgozó egy megjelenő oszcilláció periódus jelének megadott fázisában vezérlő jelet küld a központi egységnek, hogy a Knudsen cellák blendeszabályzó motorjai zárják el a molekulaáramlás útvonalát. Segítségével egy nagy biztonságú slip nélküli rendszer valósulhat meg a molekulaáramok szabályozásához.

A rétegnövesztés folyamatának irányítása a 3.18. ábrán látható számítógépes felületről történik Programozható Logikai Vezérlő (PLC) felhasználásával.

3. Eredmények

SIMATIC WinCC flexib	le Runtime			
Ga 155 °C	Knudsen Cell In	Al S	As	
Setpoint: 0 1000°C G 38°C (L) S	0 870°C G 130°C L S	0 ~1200°C G 630°C L S	0 600°C G Sublimation	Ga blende control Open Close
ON Graph Blende Start/Stop	©CFF Graph Blende Start/Stop	OFF Graph Blende Start/Stop	©OFF Graph Blende Start/Stop	OK Back to Start Screen
		Ga Trend Ir	Trend Al Trend	As Trend

3.18. ábra. Knudsen cella vezérlés számítógépes felülete

A PLC használatát a 3.19. ábrán látható módon négy fontos kommunikációs vonallal valósítottam meg. A folyamatirányító PC irányába, amelyen a 3.18. ábrán látható felület is megtalálható, a RHEED képet önállóan feldolgozó PC irányába, a Knudsen cellák hőmérsékletét mérő és vezérlő alegység irányába, valamint a Knudsen cellák blendéinek mozgató motorját figyelő és irányító alegység irányába.



3.19. ábra. A molekulaáram szabályzási rendszerének részei

Az algoritmus biztonsági alaplépése szerint a rendszer mindenkori bekapcsolásra a Knudsen cellák fűtetlen állapotát és blendéinek zárt állapotát, mint alaphelyzetet kell megkeresnie és visszaállítania. Ebből a helyzetből elmozdulás csak akkor történik, amikor a folyamatirányító PC billentyűzetének segítségével a számítógépes felületen valami átírásra kerül. Például abban a pillanatban, amikor valamely Knudsen cella hőmérséklete a felületen a szobahőmérsékletnél magasabb értékűre lesz módosítva, akkor az algoritmus alapján a PLC parancsot ad a RHEED fluoreszcens képernyőjének figyelésére és adatfeldolgozására.

A felfűtött molekulaforrás hőmérsékletének nyugtázása után annak blendéje csak kézi parancsra nyílik ki. Bezárása viszont. egyrészt a RHEED figyelő PC irányából történhet, ha az érzékelt jelet megfelelőnek tartja, másrészt a kísérletet végző személy által, amennyiben a folyamat pillanatnyi állapotát úgy ítéli meg.

Az eljárás egy olyan szabályos kristályszerkezet hozható létre az alapfelületen, ahol egy megfelelően kiválasztott GaAs egykristály alapszelet esetén a növesztett réteg rácsszerkezete tökéletesen tud illeszkedni a hordozó alaprendszeréhez.

3.7. Az eredmények értékelése

A molekulasugár epitaxiás eljáráshoz köthető téziseim próbájaként három kísérlet készült GaAs/InGaAs félvezető szerkezettel. Aktív réteghez (InGaAs) indiumot és nem aluminiumot választottam, mert az a jelenlegi vákuum érték (10^{-8} mbar) ellenére sem okoz oxidációs problémákat és folytonos réteget tudok képezni vele. Az első lépés az 1x1 cm GaAs hordozóra egy tiszta 0,5 µm vastag GaAs réteg párologtatása volt, majd csak ezután jöhetett a RHEED kép segítségével a kontrollált InGaAs növesztés (3.19. ábra). A folyamatot három különböző vastag aktív réteg kialakításával teszteltem: 0,8 µm, 1 µm és 1,2 µm (3.20. ábra).



3.20. ábra. Detektorok viselkedése különböző vastag InGaAs aktív réteg esetén

Az elvégzett vizsgálatok azt igazolták, hogy az LPE technológiával készült széles sávú LED és detektor eredményeit felhasználva, az új komplex eljárásommal a szakirodalom 50%-os energiaátalakítási hatásfoka elérhető.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A kutatómunkám során a vizsgált új napelem típusra és annak optimális felépítésére vonatkozóan elért új tudományos eredmények a következők:

- Kidolgoztam egy új, optikai minősítő módszert, amely felharmonikus mentes, monokromatikus sugárzó segítségével a napelemek különböző gyártási fázisaiban nemzetközileg hitelesített alapelemekre visszavezethető mérési adatokat szolgáltat. A módszer detektor-minősítőként kész napelemekről ad információt. Szűrő-minősítő alkalmazásban pedig lehetőséget nyújt egyrészt a vegyület-félvezetők minősítésének és technológiai folyamatának javítására, másrészt mindazon napelem típus optikai optimálását teszi lehetővé, amelyek elülső kontaktrétege átlátszó.
- 2. Módszert dolgoztam ki izzólámpáknak kis fogyasztású félvezető fényforrással való kiváltására infravörös tartományban. Lényegi eleme egy 1000-1700 nm között világító LED sorozat, mint széles spektrumú energia-átalakító. A sorozat egyes elemeinek előállítási módja folyadékfázisú epitaxia. A különböző heterostruktúrák létrehozásával, egymással félérték szélességben találkozó hullámhosszon sugárzó félvezetők alkalmazásával minimális veszteség mellett koncentrált világítást tudtam elérni a kívánt irányba. Ezen módszer szolgált alapul a széles spektrumú fényelem kimunkálásához is.
- 3. A kidolgozott új spektrofotometriás mérési módszerem felhasználásával, az 1000-1700 nm között világító LED sorozat heterostruktúrájának felépítési lépéseit alkalmazva igazoltam, hogy létrehozható egy olyan félvezető rétegszerkezetű detektor (fényelem), amelynek energiaátalakítása 1000-1650 nm tartományban +/- 5 %-on belül hullámhossz független.
- 4. Kidolgoztam egy olyan spektrális érzékenységet módosító eljárást, amely segítségével szilícium fényelemből nagy pontosságú, a szem érzékenységi görbéjéhez illesztett detektor hozható létre a napelemre érkező megvilágítás érzékeléséhez. Ezzel az eljárással teret nyitottam bármely típusú napelem pillanatnyi hatásfokának meghatározására szolgáló érzékelő eszköz előállítására mind kültéri, mind pedig beltéri alkalmazhatósággal.
- 5. Felállítottam egy a napelem szempontjából optimális, új félvezetőfajta kialakításához szükséges rendszertípus modelljét. Ehhez kapcsolódóan szimulációs és mérési eredmények alapján kidolgoztam egy olyan eljárást, melynek segítségével, nagy biztonsággal lehet új típusú napelem mintákat párologtatni. A modellhez tartozóan kidolgoztam egy olyan nagy vákuumban is használható új mintakezelési eljárást is, amely az ipari alkalmazás biztonságát és laboratóriumi alkalmazás hőmérsékleti precizitásának követelményét ötvözi.
- 6. Kidolgoztam egy új blendeszabályzó algoritmust, amellyel a mintaszelet és a párologtató anyagok kombinációjából egy tetszőleges félvezetőfajta állítható elő. Az algoritmussal a molekulaáramok olyan mértékben szabályozhatóak, hogy a kisérleti mintákra érkező molekulák száma minden fázisban optimális.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Napjainkban a Nap sugárzási energiájának átalakítási hatásfokát tekintve az egyik legperspektivikusabb irányzat a félvezető heteroszerkezetekkel történő, minél szélesebb spektrumot átölelő energiaátalakítók létrehozása.

A jobb hatásfok érdekében elérendő cél, hogy az energiaátalakulás minél nagyobb mértékben a p-n átmeneten belül történjen. Az elérendő célhoz a fényenergia félvezetőkkel történő átalakításának problémakörének fordított irányból való megközelítése igen hatékony módszernek bizonyult. A LED előállítás során szerzett tapasztalatok és eredmények alapján a meggyőző fényenergia átalakítási eredményeket az epitaxiás módszerek közül a gyorsasága és költséghatékonysága miatt folyadék fázisú epitaxiás (LPE) eljárással készült heteroszerkezetekkel sikerült elérni, ami pont a költséghatékonysága miatt a jövőben is szerephez juthat.

Az eredmények első következtetése az, hogy az eddigieknél hatékonyabb napelem struktúrák létrehozásának fontos feltétele a félvezető-kristályrétegek és nanoszerkezetek kontrollált növesztése. Ezek a néhány atomsor vastag rétegek elsősorban molekulasugár-epitaxiás berendezés (MBE) felhasználásával készíthetők el.

A rétegeket az alacsony sebességű növesztés (0.1-1 atomsor/sec) mellett folyamatosan figyelni kell (RHEED kontroll) és ez alapján szabályozni a Knudsencellából kirepülő részecskék mennyiségét. A rétegek figyelését főleg olyan szempontból javaslom, hogy az önszerveződés, azaz az egyes elemek rendezetlen halmaza miként alakul át rendezett nanostruktúrává a komponensek között fellépő kölcsönhatások révén. A szerveződés mechanizmusának pontos megismerése és ez alapján történő Knudsen-cella szabályzás a kulcsa annak, hogy többszörös kvantumvölgyeket, illetve kvantumpontokat tartalmazó nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek, valamint különböző hullámhosszon sugárzó, különböző heterostruktúrával teljesítményű rendelkező, nagy fénykibocsátó diódák elkészülhessenek.

Javaslom első sorban a CIS napelemek előállításánál a részfázisok egyenkénti spektrális optimalizálását a dolgozatomban bemutatott módszer alapján a mérhetően jobb összeredmény céljából.

Eredményeim alapján javaslom minden napelem rendszer egyes tábláinak általam is használt kontroll mérését havi rendszerességgel természetes körülmények között. Kiértékelésükkel rövid időn belül kiszűrhetők és orvosolhatók azok a problémák, amelyektől a rendszer összenergia termelése lecsökkent, illetve visszajelzéseket tud szolgáltatni a napelem gyártónak a minőség javítása érdekében.

Végezetül mindezek alapján javaslom az új eljárások és megoldások felhasználását nem csupán egy új napelem típus előállításánál, hanem különböző speciális, főként infravörös tartományban világító félvezetők gyártásánál is.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Új évezredünk legnagyobb gondja a folyamatos gazdasági növekedés fenntartásával járó emelkedő környezetszennyezés. Ezt jelentősen le tudná fékezni a megújuló energiák egyre hatékonyabb, mindenki számára elérhető, decentralizált kiaknázása, ahol például folyamatos energiaközlő a Nap. Ennek egyik eszköze a szélesebb kőrben felhasználható félvezető alapú napelemek hatásfokának növelése.

Munkám fő eredménye, hogy szilárd félvezetőkből álló széles sávú energiaátalakítók laboratóriumi megvalósításával tudtam bizonyítani, hogy a félvezetőkkel történő fénykibocsátás és fényhasznosítás problémái alapjaiban azonosak. Az előállítási folyamatok közötti átjárhatóságot kihasználva, az egymástól átörökített részmegoldásokkal, tesztfázisokkal formálni és javítani tudtam folyadékfázisú epitaxiás (LPE) eljárással készült heterostruktúrák fénykibocsátási és fényhasznosítási hatásfokát, összességében jó hatásfokú, széles körben felhasználható, széles sávú energiaátalakítókat hoztam létre.

További eredményem egy optimális, új félvezetőfajta kialakításához szükséges rendszertípus modelljének kidolgozása, amely a nanoszerkezetek elkészítési fázisaiban is kontrollálható módon egy molekulasugár epitaxiás berendezés (MBE) felhasználásával készül. Ez a legkifinomultabb és leghatékonyabb technika a nulla, egy és kétdimenziós nanostruktúrák előállítására.

A rendszertípus modellemnél a nanoszerkezetű struktúra kialakulását folyamatos (in-situ) megfigyelés alatt tudjuk tartani (RHEED kontroll), ami módot ad a részecskék párologtatási ütemének visszaszabályozására is. A rendszerbe integrált in-situ kontrollal megteremtettem a lehetőséget a struktúrák önszerveződési mechanizmusának folyamatos megfigyelésére. Ezáltal mindig a megfelelő időt és hőmérsékletet tudjuk biztosítani az új napelem készítésénél a részecskék között fellépő kölcsönhatások, azaz a rendezett nanostruktúrák kialakulásához. A modellemnél már előre meg tudjuk tervezni akár a többszörös kvantumvölgyek vastagságát, akár a kvantumpontok sűrűségét, ami elengedhetetlenül fontos a nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek, valamint különböző hullámhosszon sugárzó, különböző heterostruktúrával rendelkező, nagy teljesítményű fénykibocsátó diódák előállításakor.

Kidolgoztam egy olyan új optikai minősítő módszert, aminek segítségével el tudtuk végezni egyrészt a napelem gyártás egyes fázistermékeinek spektrális optimalizálását, másrészt a késztermékek spektrális érzékenységének kiértékelését is nemzetközileg hitelesített etalonokra visszavezethető módon.

Az új eljárásokkal és megoldásokkal nem csupán egy új napelem típust tudunk megvalósítani a jövőben, hanem speciális világító félvezető eszközöket is.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

- 1. Martin G., Muray K. **Réti I.**, Diós J., Schanda J. (1990): Miniature Integrating Sphere-Silicon Detector Combination for LED Total Power Measurement, Measurement 1990/8, pp. 84-89.
- 2. **Réti I.**, Giczi I., Muray K. (1993): Filter matching for imaging colorimetry, SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1993/10, V32, pp. 2578-2580.
- Rakovics V., Püspöki S., Balázs J., Réti I., Frigeri C. (2002): Spectral characteristics of InP/InGaAsP Infrared Emitting Diodes grown by LPE, Materials Science and Engineering B – Solid State Materials for Advanced Technology 91-92: pp. 491-494.
- Rakovics V., Balázs J., Réti I., Püspöki S., Lábadi Z. (2003): Near-infrared transmission measurements on InGaAsP/InP LED wafers, Physica Status Solidi C 2003/3. pp. 956-960.
- Szentpáli B., Berkó T., Molnár F., Réti I. (2006): Closed Space Electromagnetic Compatibility, Hungarian Academy of Scienses Research Institute for Technical Physics and Materials Science, Yearbook 2006. pp. 50-51.
- Rakovics V., Püspöki S., Réti I. (2007): Output power saturation in InGaAsP/InP surface emitting LEDs, Hungarian Academy of Scienses Research Institute for Technical Physics and Materials Science, Yearbook 2007. pp. 42-43.
- Rakovics V., Püspöki S., Réti I. (2009): Optimum design of InGaAsP/InP surface emitting LEDs for application in spectroscopy, Hungarian Academy of Scienses Research Institute for Technical Physics and Materials Science, Yearbook 2009. pp. 78-81.
- 8. Rakovics V., Püspöki S., **Réti I.** (2011): LPE growth and characterization of InP/InGaAsP infrared emitting diodes, Hungarian Academy of Scienses Research Institute for Technical Physics and Materials Science, Yearbook 2011. pp. 78-79.
- 9. **Réti I.** (2011): Technical background of very high efficiency GaAs based solar cell preparation, Research and Development, Mechanical Engineering Letters, pp. 216-226.
- 10. **Réti I.**, Ürmös A. (2012): MBE technology in the colourful LED and solar cell production, University of Óbuda e-Bulletin 2012/1, V3. pp. 191-203.
- 11. **Réti I.**, Farkas I. (2014): Some developments on molecular beam epitaxy technology for solar cell preparation, Hungarian Agricultural Engineering, No 25/2013, pp. 29-32.

Lektorált cikk magyar nyelven

- 12. Rácz M., Makai J., Ferenczi S., Réti I. (1989): Precíziós kézi fénysűrűségmérő, Automatizálás, 1989/7(1), 19-22. o.
- 13. Balázs J., Ferenczi S., Giczi I., Lánc J., Makai J., Rácz M., **Réti I.** (1991): Fotometriai és radiometriai mérések és műszerek, Villamosság, 1991/11(39), 343-346. o.
- 14. Rakovics V., Püspöki S., Serényi M., **Réti I.**, Balázs J., Bársony I. (2007): InGaAsP/ InP Infravörös diódák és lézerek, Hiradástechnika, 62:(10), 12-18. o.
- Lukács I., Szabó J., Laczik Zs., Pődör B., Réti I., Szentpáli B., Eördögh I. (2008): Makyoh topográfia, egy egyszerű és hatékony eljárás félvezető szeletek simaságának vizsgálatára, Hiradástechnika, 2008/63(1), 28-33. o.
- Nemcsics Á., Réti I., Tényi V. G., Kucsera P., Tóth L., Harmat P., Amadou M., Csutorás M., Kupás – Deák B., Sándor T., Bozsik J. (2010): Molekulasugár-epitaxiás nanostruktúrák előállításának műszaki feltételei, GÉP, LXI 2010/8, 29-32. o.
- 17. **Réti I.**, Farkas I. (2014): Optikai minősítő módszer a napelemek gyártási fázisaira, Magyar Energetika, 2014/1, 38-41. o.
- 18. **Réti I,** Ürmös A., Nádas J., Rakovics V. (2014): Nanostrukturás LED-ek, Elektrotechnika 2014/11, 19-21. o.