

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek

Doktori értekezés

Réti István

Gödöllő 2015

10.14751/SZIE.2015.025

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

	JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	5
	RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	7
1.	BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	9
	1.1. A választott téma jelentősége	9
	1.2. Célkitűzések	9
2.	SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	12
	2.1. Elméleti összefoglaló a félvezetőkről	12
	2.1.1. Fotovillamos hatás	14
	2.1.2. A Napelem karakterisztikája és hatásfoka	
	2.2. Kristályos szilícium alapú napelemek	17
	2.2.1. Egykristályos szilícium napelemek	19
	2.2.2. Polikristályos szilícium napelemek	20
	2.3. Vékonyréteg napelemek	21
	2.3.1. Vékonyréteg napelemek működése	
	2.3.2. Amorf szilícium napelem felépítése	22
	2.3.3. Amorf szilícium napelem technológiája	24
	2.3.4. CIS napelem felépítése	
	2.3.5. CIS napelem technológiája	
	2.4. Gallium-arzenid alapú napelemek	27
	2.4.1. Gallium-arzenid és rokon anyagok	28
	2.4.2. Gallium-arzenid alapú napelemek felépítése	29
	2.4.3. Gallium-arzenid és rokon anyagok technológiája	31
	2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	33
3.	ANYAG ÉS MÓDSZER	35
	3.1. Folyadékfázisú epitaxia	36
	3.2. Molekulasugár-epitaxiás berendezés	
	3.3. Precíziós mozgatások finommechanikai módszerei ultravákuumban	40
	3.3.1. Kis elmozdulással járó mozgatások ultravákuumban	40
	3.3.2. Nagy elmozdulással járó mozgatások ultravákuumban	43
	3.4. Ultra nagy vákuum előállítása és mérése	46
	3.4.1. Ultra nagy vákuum előállítása MBE rendszereknél	46
	3.4.2. Ultra nagy vákuum mérése MBE rendszereknél	
	3.4.2.1. Abszolút nyomásmérők	
	3.4.2.2. Parciális nyomásmérők, tömegspektrométerek	53

	3.5. MBE berendezéssel napelemek számára növesztett rétegek mérései.	56
	3.5.1. Ellipszometria	
	3.5.2. Rutherford-visszaszórásos Spektrometria	
	3.5.3. Pásztázó elektronmikroszkópia	56
	3.6. Napelemek optikai minősítése és a műnap	57
	3.6.1. Műnap halogén izzókkal	58
	3.6.2. Műnap xenon lámpával	60
	3.6.3. Műnap alternatívák	61
	3.6.4. Műnapok minőségi javítása	61
4.	EREDMÉNYEK	63
	4.1. Optikai minősítő módszer a napelem gyártás fázisaira	63
	4.2. Módszer széles spektrumú diódás sugárzás létrehozására	71
	4.3. Módszer InGaAs fényelem érzékenységi spektrumának szélesítésére	77
	4.4. Eljárás a napelem pillanatnyi hatásfokának meghatározásához	82
	4.5. Modell az új félvezető fajta kialakításához	88
	4.6. Molekulaáramot szabályozó algoritmus	96
	4.7. Új tudományos eredmények	102
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	103
6.	ÖSSZEFOGLALÁS	104
7.	SUMMARY	105
8.	MELLÉKLETEK	106
M	1: Irodalomjegyzék	106
M	2: A témakörhöz kapcsolódó saját irodalom	109
K	ÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	114

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

e: elemi	töltés [-1,602x10 ⁻¹	⁹ Coulomb]
----------	---------------------------------	-----------------------

- e(n): egyenletességi mutató [-]
- Eav: átlagos megvilágítási érték [lux]

E_c: vezetési energia szint [eV]

 E_F : Fermi energiaszint [eV]

 E_{foton} : a beeső foton energiája [eV]

Eg: az anyagra jellemző tiltott sávszélesség [eV]

Emax: maximális megvilágítási érték [lux]

E_{min}: minimális megvilágítási érték [lux]

E_v: vegyérték energia szint [eV]

h: Planck állandó $[6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}]$

*I*_{foto}: fotóáram [A]

I_m: munkaponti áram [A]

k: Boltzmann állandó
$$[8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}]$$

$$k_1$$
: a kollektor lineáris hőveszteség tényezője [W/m²K]

M: a napelemből maximálisan kivehető teljesítmény munkapontja [-]

P: a napelemből kivehető pillanatnyi teljesítmény [W]

P_{foto}: beeső fényteljesítmény[W]

P_m: a napelemből maximálisan kivehető (munkaponti) teljesítmény [W]

R: ellenállás [
$$\Omega$$
]

t: idő [s]

T: hőmérséklet [°K]

U: a napelem pillanatnyi feszültsége [V]

U_m: munkaponti feszültség [V]

U_t: termikus feszültség [V]

- *U_ü*: üresjárati feszültség [V]
- $V(\lambda)$: a világosban látó átlagos emberi szem spektrális érzékenységi görbéje []
- η : a napelem optikai hatásfoka [%]
- λ_l : LED spektrum fél intenzitási pontjának hosszú hullámhossza [nm]
- λ_p : LED spektrum csúcsának hullámhossza [nm]
- λ_s : LED spektrum fél intenzitási pontjának rövid hullámhossza [nm]
- $\Delta \lambda$: LED spektrum fél intenzitási pontjának sávszélessége [nm]
- v: a fény frekvenciája a fotoeffektus során [Hz]
- φ : Fill factor FF a napelem kitöltési tényezője []
- ω: körfrekvencia [Hz]

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

AC:	Alternating Current – váltóáram
CdS:	Cadmium Sulfide – kadmium-szulfid (sárga)
CdSe:	Cadmium Selenide – kadmium-szelenid (piros)
CdTe:	Cadmium Telluride – kadmium-tellurid (fekete)
CIS:	Copper Indium Selenide (CuInSe ₂) – réz-indium-diszelenid napelem technológia
CIGS:	Copper Indium Gallium Selenide (CuInGaSe ₂) – réz-indium-gallium-diszelenid napelem technológia
c-Si:	Kristályos szilícium napelem technológia
CVD:	Chemical Vapour Deposition – kémiai gőzfázisú leválasztás
DC:	Direct Current – egyenáram
ESTI:	European Solar Test Installation – európai napelem vizsgálati szabvány
GaAs:	Gallium Arsenide – gallium-arzenid
GaSb:	Gallium Antimonide – gallium-antimonid
HB:	Horizontal Bridgeman kristály húzási technológia
InAs:	Indium Arsenide – indium-arzenid
InGaAs:	Indium Gallium Arsenide – indium-gallium-arzenid
InP:	Indium Phosphide – indium-foszfid
ITO:	Indium Tin Oxide (In ₂ O ₃) átlátszó vezető réteg
LEC:	Liquid Encapsulated Chochralski kristály húzási technológia
LED:	Light-Emitting-Diode – fénykibocsátó dióda
LPE:	Liquid Phase Epitaxy – folyadékfázisú epitaxia
MBE:	Molecular Beam Epitaxy – molekulasugár-epitaxia
MQW:	Multi Quantum Well – többszörös kvantum völgy (potenciál völgy)
MS:	Mass Spectrometry – tömegspektrometria
NASA:	National Aeronautics and Space Administration – USA Repülési és Űrhajózási Hivatala
NBS:	Natoinal Bureau of Standards – USA Mérésügyi Hivatala

(1901 – 1988, azóta National Institute of Standards and Technology)

- *PECVD*: Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztás
- PLC: Programmable Logical Controller programozható logikai vezérlő
- PVMT: Photovoltaic Module Tester napelem modul mérő
- *QD*: Quantum Dot kvantum pont
- *QMS*: Quadrupole Mass Spectrometer négypólusos tömegspektrométer
- *QW*: Quantum Well kvantum völgy (potenciál völgy)
- *RBS*: Rutherford Backscattering Spectrometry Rutherford-visszaszórásos spektrometria
- *RF*: Radio Frequency rádió frekvencia (3 kHz 300 GHz)
- RHEED: Reflection High Energy Electron Diffraction nagyfeszültségű súrolószögű elektron diffrakció
- SEM: Scanning Electron Microscope pásztázó elektronmikroszkóp
- *STC*: Standard Test Conditions amerikai napelem vizsgálati szabvány
- *TCO*: Transparent Conducting Oxide átlátszó vezető oxidréteg
- TOF: Time of flight ionok átlagos repülési ideje
- UHV: Ultra-High Vacuum ultra nagy vákuum
- WMO: World Meteorological Organisation Meteorológiai Világszervezet
- *XRD*: X-ray Diffraction röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálat
- ZnO: Zinc Oxide cink-oxid
- *ZnS*: Zinc Sulfide cink-szulfid

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a választott témakör aktualitását taglalom, majd a dolgozat célkitűzéseit fogalmazom meg.

1.1. A választott témakör jelentősége

Új évezredünkben társadalmi létünk legnagyobb kérdése az, hogy miként tartható fenn a folyamatos gazdasági növekedés anélkül, hogy a vele járó energiaigény, ami pesszimista előrejelzések szerint 2020-ra akár meg is duplázódhat, ne okozzon visszafordíthatatlan károsodásokat szűkebb és távolabbi környezetünkben (*Green, 1986*). A hagyományosan használt fosszilis energiahordozók elégetésével mára már jól kimutatható a környezetszennyezés és Földünk átlaghőmérsékletének emelkedése. Európában a leginkább szorgalmazott megoldás, a megújuló energiaforrások alkalmazásának kiszélesítése és minél jobb hatásfokkal történő kihasználása, velük decentralizált termelőhelyek kiépítése.

A felettünk növekvő ózonjuk nem csak figyelmeztet, hanem egyúttal megoldást is kínál. Az általa megnövekedett Föld felszínére jutó napsugárzás plusz természetes energiát szolgáltat. Csak rajtunk múlik annak hatékony kiaknázása és a káros folyamat megállítása.

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.

Doktori munkámban ezen célok elérését mutatom be.

1.2. Célkitűzések

Munkám során olyan új heteroszerkezetű félvezetők kidolgozását tűztem ki célul, amelyekkel szélesebb spektrumban, az eddigieknél jobb hatásfokkal érhető el az energiaátalakítás. A félvezetőknél pedig annál jobb a hatásfok, minél nagyobb mértékben a p-n átmeneten belül történik az ergiaátalakulás. Így gyakorlatilag jellegükben mind a fénykibocsátásnál, mind a fényhasznosításnál ugyanazokat a rácsillesztetlenségi és hibahely minimalizálási feladatokat, valamint nem kívánatos energiaátalakulási problémákat kell megoldani. A feladatok megoldásának sorrendjét a meglehetősen nagy eszközigény jelöli ki. Így első lépésként kevésbé folyadékfázisú epitaxia (LPE) eljárással költségigényes olyan speciális heterostruktúrák kidolgozása lett a cél, amelyek egy meghatározott tartományban egymáshoz közeli hullámhosszon tudnak sugározni, illetve fényt elnyelni. A következő cél pedig, hogy egy félvezetőn belül több egymáshoz közeli hullámhosszon tudjon megtörténni ez az energiaátalakulás a nagyobb hatásfok érdekében.

Az elméleti hátteret átfogóan tartalmazza a (*Lendvai, 1989, valamint Nemcsics, 2005*) forrás. A fentieken kívül célom volt még olyan eljárások és algoritmusok kidolgozása, amik segítségével az új napelem, vagy hasonló felépítésű félvezető világító eszköz előállítása a nagy bonyolultságú gyártó eszközök ellenére reprodukálható módon és nagy biztonsággal megvalósulhasson.

A munkám időszerűségét jelzi, hogy a közelmúltban értek el mások is kitűnő eredményeket (*Woo et al., 2011, Leite et al., 2013*) ugyancsak InP alapanyaggal, amelyek az én dolgozatom két tézisének alapját is képzik.

A fenti célok, pontokba szedve és részletezve, 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.

A multi funkciós (több rendeltetésű) nemzetközi etalonra visszavezethető optikai mérőmódszer és minősítő eljárás kidolgozását alapvetőnek tartottam egyrészt korábbiakban készített napelem típusok előnyeinek és hátrányainak kivizsgálásához, másrészt biztos kontrollt szolgáltat újabb és elméletileg jobb

gyártási fázisok, vagy alapvetően új félvezető fajták előállítási folyamatainak bevezetése során. Ezért helyeztem az elérendő célok első helyére.

A további részfeladatok megvalósulása esetén lehetőség nyílik még arra is, hogy olyan új LED struktúrák is kialakíthatóvá válnak, amely az eddigieknél nagyobb, vagy más hullámhosszú fény kibocsátására alkalmasak.

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

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a témához kapcsolódó szakirodalmat tekintettem át megadva az összefoglaló értékelését is.

2.1. Elméleti összefoglaló a félvezetőkről

A gyártási technológia rohamos fejlődése lehetővé tette, hogy a korábban még csak laboratóriumokban előállítható a nap energiáját jó hatásfokkal villamos energiává átalakító félvezető eszközöket ma már egyre szélesebb körben próbálják ipari környezetben is előállítani.

A szerves félvezetők térhódítása óta (*Bradley*, 1991) fontosnak tartottam egyértelműen jelezni, hogy munkám túlnyomó többségében a szervetlen félvezetőkkel törénő energiaátalakítás hatásfokának növelésével foglalkoztam.

Ezeknél a szilárdtest félvezetőknél a legfelső betöltött sáv (a vegyérték sáv) és a következő lehetséges energiasáv (a vezetési sáv) közötti energiatartomány (a tiltott sáv) szélessége kisebb 3 eV-nál. Azáltal, hogy az elektronenergiák megengedett értéke függ az elektronok momentumától, így jó hatásfokú elektronátmenet a (fénykibocsátáskor), vezetési sávból а vegyértéksávba illetve fordítva (fényhasznosításkor) csak olyankor lehetséges, amikor az elektron impulzusa gyakorlatilag változatlan marad, mivel a foton impulzusa (hv/c) nagyságrendekkel kisebb az elektron impulzusánál. Emiatt a jó hatásfokú LED és lézer, illetve fényhasznosító megvalósítására csak olyan félvezető jöhet szóba, ahol a 2.1. ábra alapján a vezetési sáv alja és a vegyérték sáv teteje azonos elektronimpulzusnál van. Ezek a számomra az anyag kiválasztásban fontos direkt sávú félvezetők (Pődör, 2010).



2.1. ábra. Direkt és indirekt félvezetők rekombinációja

Direkt sávú félvezetőket és kapcsolataikat mutatja a 2.2. ábra. Folytonos összekötő vonalak a közvetlen átmeneteket, a szaggatott a közvetett átmeneteket jelzik.



2.2. ábra. Direkt és indirekt sávú félvezetők kapcsolata

Az ábrából kitűnik, hogy például a nitrid-félvezetőkben kation cseréjével a tiltott sáv a következők szerint csökken és a működési hullámhossz pedig nő: AIN > GaN > InN. Ez azt jelzi, hogy a nitrid-félvezetők elegyeiből az ultraibolyától a közeli infravörös tartományig terjedő spektrumban működő LED-ek és detektorok készíthetők. Más hullámhossz tartományt ölel föl, ha gallium-alapú félvezetőket alkalmazunk, viszont a tiltott sáv csökkenő sorrendje és a hullámhossz növekvő sorrendje ugyanúgy felállítható: GaN > GaAs > GaSb.

A 2.2. ábrából kitűnik az is, hogy a Si indirekt sávú félvezető, aminek tiltott sáv szélessége kisebb, mint a másik két félvezető anyagé, mégsem képes a Si alapú félvezető jó hatásfokú energiaátalakításra (mint lézer esetén kellene), a 2.1. ábrán látható indirekt rekombinációs vesztesége miatt.

Bár már a hatvanas évek végén meghatározták a direkt és indirekt sávú félvezetők tiltott sávszélességének és a hozzá tartozó hullámhosszának és a rácsállandójának összetételüktől való függését (*Kressel, Nelson, 1968, Hayashi et al., 1969*), mégis sok tapasztalatra volt szükség ahhoz, hogy a váratott magára.

A kétkomponensű félvezetőkön túl használatosak még három- vagy négykomponensű anyagok is, amennyiben a kívánt cél egy speciális hullámhosszon történő energiaátalakítás. Ezekben az esetekben ügyelni kell arra, hogy az egymásra épített rétegek deformációja kristályhibák megjelenéséhez vezet egy kritikus vastagságnál (*Jasik et al., 2002, Holec, 2006*).

A magas szintű technikai háttér kiépülése lendületet adott újabb olyan anyagösszetevők tovább kísérletezéséhez, amelyekben a Nap sugárzás hatására töltéshordozó lyuk-elektron párok jönnek létre.

2.1.1. Fotovillamos hatás

A napelemnek, mint félvezető eszköznek a fényelektromos hatást nézve egy vékony, rendszerint p-n átmenet a legfontosabb része. Ugyanis itt zajlik a beérkező fotonok hatására a töltéshordozó párok szétválasztása (2.3. ábra). A p-n átmenetre jellemző E_g tiltott-sávszélességnél nagyobb energiával becsapódó fotonok generálják azokat a töltéshordozó-párokat, amiket a p-n átmenet elektrosztatikus tere szétválaszt. E tér miatt az elektronok a félvezető egyik oldalára az *n*-tartományba, míg a lyukak a másik oldalára a *p*-tartományba sodródnak. Az átmenetben a fotoáram és a záróirányú sötét áram iránya megegyezik.



2.3. ábra. A fotovillamos hatás, egyszerű pn-átmenet sávábrája fotogerjesztés hatására és az áram-feszültség karakterisztikája sötétben és megvilágítva

(Nemcsics, 2005)

A félvezető az energiáját a két oldalán felhalmozódó töltéshordozókból nyeri. Megfelelő kontaktálás esetén felhasználói szemszögből az eszközt úgy tekinthetjük, mint egy galván elemet. Ugyanúgy beszélhetünk üresjárati feszültségről $U_{\ddot{u}}$, amit nagy belső ellenállású feszültségmérővel detektálhatunk, mint rövidzárási áramról I_r , amit pedig kis belső ellenállású árammérővel mérhetünk a kivezetésekre kapcsolódva. A gyártók rendszerint ezt a két adatot tüntetik fel termékeiken, de tervezéskor nem szabad elfeledkezzünk arról a jelenségről, hogy mihelyt a két kivezetésre egy fogyasztót (*R* ellenállást) kapcsolunk, abban a pillanatban a félvezető két oldalán felhalmozódó töltéshordozók mennyisége csökken. Ez pedig az elektromos tér töltéshordozó szétválasztó hatását is csökkenti.

Így eredő áramként a sötétáram és a fotóáram különbségével kell számoljunk az alábbi egyenlet szerint:

$$I = I_{foto} - I_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \tag{2.1}$$

ahol a: $\frac{kT}{e}$ kifejezés az U_t termikus feszültséget jelenti.

A kifejezésből több lényeges dolgot olvashatunk ki. Egyrészt a fotóáram egyenesen arányos a megvilágítás erősségével, másrészt a fotófeszültség logaritmikus mértékben függ tőle. Ebből kaphatjuk meg a rövidzárási áramot is U=0, illetve az üresjárati feszültséget I=0 helyettesítéssel.

Az elérendő cél is jól látható ebben az egyenletben – a pn-átmenet I_s telítési áramának csökkentése ($I_s \approx 10^{-14} - 10^{-15}$ A). Ez például magas töltéshordozó koncentráció, vagy nagy tiltott sáv szélességű félvezető alkalmazásával történhet.

2.1.2. A napelem karakterisztikája és hatásfoka

A napelemek hatásfokát legszemléletesebben annak áram-feszültség karakterisztikájából olvashatjuk ki. A 2.4. ábrán a satírozott rész a maximálisan kivehető teljesítményt jelenti.





Az *M* munkapont, a kimért *I* görbe és az üresjárati feszültség $U_{\bar{u}}$, valamint rövidzárási áram I_r által jellemzett téglalap átlójának metszéspontja lesz. Ez meghatározható úgy is, ha nézzük a teljesítmény egyenletét:

$$P = UI = UI_{foto} - UI_{s} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right),$$
(2.2)

majd megkeressük az egyenlet szélső értékét, a $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$ feltétellel. Ha sikerül a

terhelést optimálisan megválasztani, akkor a kivehető teljesítmény a 2.2. ábra vonalkázott területe lesz, vagyis a munkaponti feszültség (U_m) és a munkaponti áram (I_m) szorzata: $P_m = U_m I_m$. Hányadost képezve $U_{ii} I_r$ szorzattal egy φ értéket kapunk, amit a 2.2. ábra képi megjelenése miatt kitöltési tényezőnek (Fill factor-FF) is szokás nevezni:

$$\varphi = \frac{U_m I_m}{U_{ii} I_r}.$$
(2.3)

A gyártók legtöbbször adatlapjukban ezt az értéket közlik, ami általában 0,75 és 0,85 közé szokott esni. A napelem hatásfoka pedig a maximálisan belőle kivehető teljesítmény és a beeső fényteljesítmény hányadosából adódik:

$$\eta(\%) = \frac{U_m I_m}{P_{foto}} x 100 \% = \frac{U_{\ddot{u}} I_r \varphi}{P_{foto}} x 100 \% .$$
(2.4)

A napelem hatásfokának kiszámításánál nagyon fontos paraméter a félvezető anyagra jellemző E_g tiltott sáv nagysága. Ha a beeső foton energiája (E_{foton}) kisebb, mint az anyagra jellemző tiltott sáv szélessége, akkor az nem fog töltéshordozókat kelteni. A töltéshordozó-generálás elengedhetetlen feltétele, hogy a beeső foton energiája legalább akkora legyen, mint a tiltott sáv szélessége. Ha több, akkor az a többletenergia ($E_g - E_{foton}$) nagyságú hőmennyiségként disszipálódik.

A 2.5. ábra jól szemlélteti a napelemek elméleti hatásfok változását a tiltott sáv függvényében különböző alapanyagok esetén. A valóságos hatásfok értékek a gyártási technológiától függően többé-kevésbé kisebbek, amik többnyire reflexiós, termikus és rekombinációs veszteségekből adódnak, de a rosszul vezetett kontaktus is beárnyékolhat.



2.5. ábra. A különböző félvezetőkkel pn-átmenetes napelem konstrukcióban elméletileg elérhető maximális hatásfok a tiltott sáv függvényében *(Nemcsics, 2005; Farkas, 2003)*

További hatásfok változást befolyásoló tényező a félvezető hőmérséklete. Sajnos tudomásul kell vegyük, hogy a napsugárzási spektrumban nem csak a félvezető szempontjából jótékony tartomány található, hanem az infra tartomány is. Hatására azonos megvilágítás mellett a rövidzárási áram jelentéktelen növekedését tapasztalhatjuk, viszont az üresjárati feszültség hőmérsékleti tényezője anyagfüggő. Tehát a napsugárzás növekedésével a napelemnek teljesítménye ugyan nő, viszont belőle energiát kinyerni csak kisebb hatásfokkal tudunk.

2.2. Kristályos szilícium alapú napelemek

A hagyományos szilícium alapú napelemeket leggyakrabban egykristályos, vagy polikristályos szilíciumból állítják elő, kiforrott és relatíve olcsó technológiája miatt. Az eszköz foszfor diffúzióval szennyezett pn-átmenetből, illetve homlokilletve egy hátoldali fémezésből épül fel. Utóbbiak egyben az eszköz kontaktus felületei is. A homlokoldali fémezés csak részben, míg a hátoldali fémezés teljes egészében beborítja a felületet. Az egykristályos és polikristályos szilíciumból többféle struktúrát is előállítanak. Az egyik, legnagyobb mennyiségben előállított struktúra a vastagréteg-kontaktusú napelem. A 2.6. ábrán egy ilyen tipikus pn-átmenetes vastagréteg-kontaktusú napelem cellát láthatunk.



2.6. ábra. Tipikus pn-átmenetes vastagrétegkontaktusú napelemcella
1: gyűjtőelektróda, 2: mellékelektródák, 3: antireflexiós réteg, 4: n-réteg,
5: pn-átmenet, 6: p-típusú hordozó,7: hátoldali kontaktus (*Nemcsics, 2003, 2005*)

Ipari körülmények között ezzel a technológiával 13-15 százalékos hatásfokú napelem cellák készíthetők. Elterjedt megoldás az előbb említett cella továbbfejlesztett változata is. Ezt az motiválta, hogy kiderült, hogy a napelem hatásfokát a homlokoldali fémezés árnyékoló hatása és soros ellenállása jelentős mértékben rontja. Ez a viszonylag nagyobb hatásfokú napelem az eltemetett kontaktusú cella nevet viseli (2.7. ábra).



2.7. ábra. Nagy hatásfokú cellakonstrukció (Nemcsics, 2003)

Ennél a technológiánál a fémezést vertikális kialakításúvá tervezték át. A félvezető szeletekbe lézerrel kb. 20 µm széles és 100 µm mély árkokat vájnak ki, majd

ezeket fémmel töltik ki galvanikus úton. Az így készült napelemek hatásfoka nagy sorozatban eléri a 16-17 százalékot.

A kristályos szilícium napelemek típusai a rácsszerkezetük szerint:

- 1. Egykristályos, más néven monokristályos napelem, ha teljes rácsszerkezete egyetlen szabályos kristályból áll,
- 2. Polikristályos napelem, ha sok, véletlenszerűen kialakult és egymáshoz szabálytalanul csatlakozó kristályokból tevődik össze.

2.2.1. Egykristályos szilícium napelemek

Hazánkban 1990-ig a napelemek többnyire teljesen tiszta egykristályos sziliciumból készültek. Az előtisztított homokot szénnel kémiai reakcióba hozzák, majd a nyert szemcséket további kémiai és termokémiai eljárások segítségével megtisztítják és az így nyert szilíciumot egykristállyá húzzák, Ezután a többnyire kör keresztmetszetű egykristály rudakat felszeletelik. (Gyártanak még szalag formára húzott egykristályos szilíciumot is, de az kevésbé elterjedt az alacsonyabb hatásfoka miatt). A szeletek rácsszerkezete egyszerű, köbös, lapközéppontos szilícium kristály (2.8. ábra).



2.8. ábra. Egyszerű köbös, lapközéppontos sziliciumkristály szerkezete (*Bathó, 2010*)

A stabil rácsszerkezetű szeletekből kialakított napelemek gyártása kezdetben azért terjedt el széles körben, mert a bennük lezajló fizikai folyamatok könnyen ellenőrizhetően követték az elméletet és csupán a diffúziós félvezető technológiai eljárásokra kellett koncentrálni a jó p-n átmenet eléréséhez. Az áramvezetők mára már megbízható vákuum, illetve szitanyomásos kialakítása a legyártott napelemeknek hosszú élettartamot eredményezett. Mára már a kedvezőbb hatásfok érdekében (15-17%) a nagy számban előállított és jutányos áron kapható egykristályos napelemtáblákat is antireflexiós bevonattal láttak el (2.9. ábra).



2.9. ábra. Egykristályos napelem szelet és tábla (Manitu Solár Kft., 2014)

2.2.2. Polikristályos szilícium napelemek

A kristályos szilícium alapú napelemeknek mára komoly versenytársává fejlődött annak polikristályos változata. Oka az előállítási költségekben rejlik. Az elektronikai tisztaságú szilícium alapanyagot megömlesztik, ezután egy négyszögletes grafittégelybe öntik, majd szabályozott lehűtési gradiens mellett kikristályosítják. E folyamat több oszlopos egykristály szemcsés gócpontból indul, végül ezek együttes megszilárdulásával egyetlen polikristályos tömböt alkot.

A 2.10. ábrán látható polikristályos alapanyag szabálytalan törésmintázatából jól kitűnik az alapanyag inhomogenitása. Az egykristály szemcséknél a napelem szempontjából káros határátmenetek képződnek, amelyeket a tömb szeletelése után egy további hidrogénezéses technológiai lépéssel inaktiválnak. Ezen plusz lépés ellenére ez az öntéses módszer sokkal energiatakarékosabb és ezáltal olcsóbb, mint a monokristályos anyagé.



2.10. ábra. Polikristályos szilícium (Advanced Solargy Inc., 2014)

Az olcsóbb árkategória nagy keresletet gerjesztett. A nagy tömegű előállítás hatására viszont kifinomodott a gyártási technológia is olyan szintre, hogy a

polikristályos napelemek hatásfoka 13-15% (Farkas, 2003), ami alig marad el monokristályos vetélytársától.

A közel azonos hatásfokok miatt mindkét kristályos szilícium napelem típusból készült táblák nagysága már leginkább azonos, követve ezzel a felszerelésükkel kapcsolatos felhasználói igényeket. A 2.11. ábrából a hasonló nagyságok ellenére mégis jól kitűnik a polikristályos alapanyag a jellegzetes négyszögletes tömb szeletekből és azok sajátos rendezetlen visszacsillogásából.



2.11. ábra. Polikristályos napelemtábla (Manitu Solar Kft., 2014)

2.3. Vékonyréteg napelemek

Közel tíz éve komoly verseny indult meg a kristályos szilíciumból előállított és a sokkal kevesebb nyersanyagot igénylő vékonyréteg technológiájú napelemfajták között. A verseny egyik komoly előmozdítója a szintén vékonyréteg technikával készülő mobiltelefon és globális helymeghatározó kijelzők, valamint síkképernyős monitorok és televíziók. A legkritikusabb problémára, az átlátszó vezető oxidok (TCO) előállítására egyre tökéletesebb és hatékonyabb technológiák alakultak ki. Ugyan az első TCO anyag, ami Rupprecht nevéhez kötődik (*Milton et al., 2007*), az In₂O₃ (ITO) réteg már 1954-ben rendelkezésre állt, mégis több évtized kellett ahhoz, hogy az alkalmazási kör kiszélesedjen, illetve további hasonló tulajdonságú követői az SnO₂ és a ZnO, bevezetésre kerüljenek.

2.3.1. Vékonyréteg napelemek működése

Vékonyréteg napelemek többnyire vegyület-félvezetőkből készülnek. Tulajdonságai (sávszélesség, abszorpciós képesség stb.) széles tartományban változtathatóak, az alkotóelemek, illetve azok arányainak függvényében. Közöttük igen sok a direkt sávszerkezetű. Az ilyen félvezetők alkalmazása a napelem készítésben jelentősen megváltoztatta a szilícium technológiában megszokott cellakonstrukciót. A fény teljes abszorpciójához ezeknél az anyagoknál néhány µm vastagságú réteg elegendő. A vékonyréteg napelemek működésének az alapja az, hogy a beeső fotonok az abszorbeáló rétegben keltenek elektron-lyuk párokat. Egy ilyen átmenet sávábráját láthatjuk a 2.12. ábrán (*Nemcsics, 2006, 2009*).



2.12. ábra. Átlátszó vezetőoxiddal ellátott vékonyréteg félvezető heteroátmenetének sávábrája

Ezek a vékony rétegek nem önhordóak, így a műszaki felhasználhatóság miatt vastagabb hordozó anyag is szükséges (például üveg vagy fémfólia). Sajátossága még, hogy a homlokoldalon nem fémezési hálózatot, hanem átlátszó vezető oxidot használnak, melyek fajlagos ellenállása praktikusan $10^{-3} \Omega$ cm alatt és átlátszóságuk a látható hullámhossz-tartományában (400-750 nm) 85% fölött van. Ezáltal a kontaktus kiárnyékoló hatása elmarad. Előnyük az olcsó, egyszerű technológia, az anyagtakarékosság, illetve a lehetséges nagy modulméret.

2.3.2. Amorf szilícium napelem felépítése

Az amorf szilícium napelem egy speciális fajtája a vékonyréteg napelemeknek. Az "amorf" szó latin eredetű, jelentése: "formálatlan". Abban az esetben beszélünk ilyen napelemről, ha - az egykristályos és polikristályos napelemekkel ellentétben - az anyag kristályszerkezete nem tartalmaz szigorú rendezettséget, vagy csak rövid távú rendezettség van benne. Például az üveg ilyen anyag. E napelem működése ugyanolyan, mint az előzőekben tárgyalt p-n átmenetet tartalmazó napelemé (*Eric, Deng, 2011*). Előnye, hogy vékonyréteg formában könnyen előállítható, ezért nagyon gyakori napelem típus.



2.13. ábra. Amorf szilícium napelem felépítése pin-struktúrával

Az amorf szilíciumot p-típusú esetben diboránnal, n-típusú esetben foszfinnal adalékolják. Ennek következtében hidrogén épül be az amorf anyagba, ami leköti a szabadon maradt kötéseket (*Green, 2005, Arkhipov, Poortmans, 2006*). Az így keletkezett gallium- arzenidhez hasonló direkt tiltott sávú anyag az úgynevezett α -Si:H (*Schicho, 2011*), amelynek a tiltott sávszélessége 1.7 eV. Kiváló abszorpciós tulajdonságai ellenére a hatásfoka csupán 7-12%, az adalékolás miatt gyenge töltéshordozó transzport tulajdonságai miatt. A másik negatív tulajdonsága az, hogy nem stabil, ezáltal idővel fokozatosan romlik a hatásfoka. Ez az úgynevezett Saeber-Wronski effektus. E problémák megoldására fejlesztették ki a pin struktúrát (*Nemcsics, 2005*). E felépítés lényege az, hogy egy vékony p^+ és egy n^+ réteg közrefog egy ~500 nm széles semleges "*i*" (intrinsic) réteget (2.13. ábra), amelyben záróirányú előfeszítés esetén nincsen tértöltés, viszont nyitóirányban a szomszédos p^+ és n^+ rétegből be fognak lépni töltéshordozók, amik le fogják csökkenteni ezen vastag réteg ellenállását. Ezáltal nagy áramok mellett is kicsi marad a nyitó feszültség.

Annak ellenére, hogy az amorf szilícium a leggyengébb hatásfokú napelem (~6-8%), mégis gyakran alkalmazzák más előnyös tulajdonságai miatt. Ennek az az oka, hogy olcsón előállítható és a szórt fényt is jobban tudja abszorbeálni. A hatásfok növelésére a korábbi években több német kutató intézet is összefogott, mint a Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films (IST), az Institute of Photovoltaics (IPV), az Applied Films GmbH, az RWE Schott Solar, Sentech Instruments GmbH, Institute of Thin Films and Interfaces (*Ruske et al., 2005, 2008*), ahol a cél a minél optimálisabb tulajdonságú ZnO mint TCO réteg előállítása volt leginkább amorf szilícium napelemekhez. A kutatási programból kiderült, hogy mennyire fontos a ZnO szerkezete, mert mint aktív réteg hordozónak illeszkednie kell a rá növesztésre kerülő Si réteghez. A koordinált kutatás eredményei főleg Németországban szembeötlőek lettek (2.14. ábra).



2.14. ábra. Vékonyréteg napelemek a München-i Műszaki Főiskola üvegfolyosóján kívülről (bal) és belülről (jobb) nézve (*Réti, Ürmös, 2012*)

Általában olyan épületeken jelennek meg ezek a napelem típusok, ahol amúgy is nagy üvegfelület volt a tervezési cél, viszont a túlzott napsugárzás kiszűrése szintén gondot okozna.

Néhány évvel ezelőtt még hazánkban volt Közép Európa legnagyobb amorfszilícium napelem gyára, míg pénzügyi okokból el nem költöztették Távol keletre.

2.3.3. Amorf szilícium napelem technológiája

Az amorf szilíciumot számos eljárás ismerete ellenére többnyire szilán gáz (SiH₄) bontásával készítik (*Nemcsics, 2005; Räuber, 2008*) különféle CVD eljárásokkal, főként plazmával segített CVD technológiával (PECVD). A hordozónak megfelel az olcsó nátronüveg, de alkalmaznak acélfóliát is (*Farkas, 2003*), mivel az ülepítés alacsony hőmérsékleten zajlik. A rétegleválasztás során nagy mennyiségű hidrogén épül be az amorf szilíciumba, a technológiai paraméterek változtatásától függően. Ez a kialakuló rácshibák villamos kompenzációjához fontos, mert jelentős mértékben javítja az alapanyag minőségét. Egy 1-2 µm vastag vékonyréteg már megfelelő, hiszen az amorf szilíciumnak az abszorpciós együtthatója nagyon nagy. A létrehozott réteg semleges, de *p* és *n* típusúvá is alakítható, ha a reaktorgázhoz diboránt, illetve foszfint keverünk.

A 2.15. ábrán (*Räuber, 2008*) megfigyelhető, hogy ez a rétegstruktúra nem egy megszokott p-n átmenet, hiszen egy semleges réteg is van a p és az n rétegek között. Itt, egy erős villamos tér alakul ki, ami segíti a rétegben mozgó töltéshordozók szétválasztását.





2.3.4. CIS napelem felépítése

A CIS napelem is egy gyakran alkalmazott vékonyréteg napelem fajta. CIS és CIGS napelemek esetében a p-n átmenetet p-típusú abszorber és n-típusú ablakréteg alkotja (2.16. ábra).



2.16. ábra. Egy tipikus CI(G)S alapú napelem szerkezete (Németh, 2009)

A sugárzás rövid hullámhosszú komponense elnyelődik, közel az ablakréteg felületéhez. Ellenben a látható és közeli infravörös sugárzás döntő része (ami az abszorbens tiltott sávjánál nagyobb energiájú fotonokból áll) eljut a p-n átmenet közvetlen környezetébe. Itt a gerjesztett szabad töltéshordozókat a p-n átmenet belső villamos tere szétválasztja, majd a kontaktusok felé hajtja. A napelemek legfontosabb paramétereit (maximális üresjárati feszültség, rövidzárási áram) főként a legkisebb tiltott sávú abszorbens réteg határozza meg, de ezek a maximum értékek csak ideális p-n átmenet esetén valósíthatók meg. Az anyagban rekombinálódó töltéshordozók, nem járulnak hozzá az elektromos energia termeléséhez. Emiatt rendkívül fontos, hogy a rétegstruktúra kialakítása optimális legyen. A hasznosítható elektromos energiát - a rekombinációs veszteségen túl - a

struktúra belső ellenállása is jelentős mértékben korlátozza. Az erős mértékben adalékolt, nagy vezetőképességű ablakréteg nem tud ideális p-n átmenetet alkotni. Emiatt az abszorber és az átlátszó vezetőréteg közé egy közepes mértékben adalékolt vékonyréteg van beépítve. Az ablakréteg előoldali kontaktus rétege legtöbbször ZnO, amely egyre szélesebb palettájú technológiával (*Baji, 2013*) DC, illetve RF porlasztással, vagy CVD módszerrel (*Smith, 1983*), vagy ionizált klaszternyalábbal (*Takagi et al., 1978*) készül, mert ez átlátszó a teljes látható és a közeli infravörös tartományban, valamint könnyen adalékolható és olcsó.

2.3.5. CIS napelem technológiája

A fotoaktív CIS réteget alapvetően kétféle technológiával készítik:

- 1. Az összes elemet egyszerre rá párologtatják egy hordozó felületre.
- 2. Réz és indium fémek keverékét egy felületre porlasztják, a szelén összetevőt pedig szelén gőz hevítésével viszik fel a felületre.

A hordozó egy vékony üveglemez, amely molibdén réteggel van bevonva. A p-n átmenet egy nagyon vékony CdS réteg felvitele során alakul ki. A CdTe napelemekhez hasonló módon többrétegű elemfelépítés alakítható ki. A megvilágítás oldali kontaktust egy átlátszó ZnO réteg adja (2.17. ábra).



2.17. ábra. CIS elem felépítése (Lábadi, Réti et al., 2004)

A soros kapcsolás – a többi vékonyréteg napelemhez hasonlóan - az egyedi napelemek szétválasztásával és összekapcsolásával alakítható ki, a gyártás folyamata során.

A réteg leválasztás történhet porlasztással, vákuumpárologtatással és elektrokémiai eljárással is (*Nemcsics, 2005*). Az így keletkezett réteg, polikristályos szerkezetű. Az ebből készült napelem rövidzárási árama és üresjárati feszültsége jelentős mértékben függ a leválasztás paramétereitől. Ezért fontos az olyan integrált vákuumtechnikai rétegleválasztó berendezés kialakítása, amelyből nem kerül ki a napelem addig, amíg az összes rétegszerkezet felépítésre nem kerül. A 2.18. ábrán egy ilyen integrált rendszer elvi vázlata látható (*Németh és tsai, 2007*).



2.18. ábra. Integrált rétegleválasztó elvi vázlata

Az elvi vázlat egyik 2007-re megvalósult berendezése látható az MFA-ban készült 2.19. ábrán, amelynek segítségével 300x300 mm négyzet alakú kísérleti napelemek készülhettek *(Németh és tsai, 2007)*.



2.19. ábra. Integrált vákuumrendszer előtérben a lézervágó kamrával

2.4. Gallium-arzenid alapú napelemek

A monokristályos gallium-arzenid (GaAs) alapú eszköztechnológia erősen eltér a Si alapútól. A legszembeötlőbb különbség a félvezető alapanyag direkt sávszerkezete. E tulajdonság egyik következménye a nagyon nagy abszorpciós képesség, valamint az összetétellel változtatható tiltott sáv-szélesség (Olson et al., 2003). Ezáltal a szilíciumnál sokkal vékonyabb anyagréteg is elegendő a fény elnyelésére és az összetétellel változtatható tiltott sáv-szélesség miatt több egymásra illesztett napelem is létre hozható úgy, hogy a nap spektrumát optimalizált lépcsőkkel el lehet nyeletni. Ebben az esetben az egymásra épülő napelemek úgy készülnek, hogy a napelem emeletek kapcsolódási felületeinek p, illetve n rétegei néhány molekula vastagságban többletadalék anyagot kapnak egy plusz ciklusban, amitől kellően vezetővé válnak ahhoz, hogy mint napelem a következő ráépülő napelemhez egy gyártási folyamaton belül sorba kapcsolódhassanak. További nagy előny még ezen anyagok homológ epitaxiája.



2.20. ábra. GaAs alapú napelem típus hatékonyságának összehasonlítása más napelem fajtákkal (Oriel Product Training, 2014)

A 2.20. ábra szemléletesen bemutatja, hogy a nap spektrumából a monokristályos GaAs mennyivel hatékonyabban tud energiát átalakítani más napelem alapanyagokkal szemben. Ezen tulajdonságok miatt a napelem gyártás ideális alapanyagának mutatkozik. Galliumból viszont sokkal kevesebb található földünkön, ezért leginkább a koncentrátoros alkalmazása van elterjedőben.

2.4.1. Gallium-arzenid és rokon anyagok

Gallium-arzenid a III-V-ös vegyület-félvezetők napelem szempontjából ezidáig legvárományosabb képviselője. A szemléletesebb megjelenítésért a 2.21. ábra ki is emeli a periódusos rendszerből ezeket az elemeket. Ezek a III-V félvezetők lehetnek két-, három- vagy négykomponensű anyagok.



Az elemek periódusos rendszere

2.21. ábra. III-V félvezetők helye a periódusos rendszerben

A legkisebb rendszámú atomokat tartalmazó anyagok tiltott sávja a legnagyobb (a BN már szigetelő). Az V. oszlop elemeit cserélve egyre kisebb tiltott sávú anyagot kapunk. Például gallium-alapú félvezetők esetén a tiltott sáv rendre a következőképp csökken és a működési hullámhossz pedig nő: GaN > GaAs > GaSb. Az anyagok rácsállandója és törésmutatója ellentétesen változik a tiltott sáv változásával, azaz a nagyobb tiltott sávú félvezetőnek van a kisebb rácsállandója és törésmutatója.

Figyelemre méltó, hogy a kétkomponensű félvezetők tiltott sávja mindig nagyobb, mint a közel azonos rendszámú elemi félvezetőké, mert az eltérő elektronegativitás miatt a vegyület-félvezetők kötése ionos jelleget is mutat, az elektrosztatikus vonzás energiája pedig növeli a kötéserősséget. A GaAs tiltott sávja 1,45 eV, de a vele azonos sorban lévő Ge csak 0,76 eV tiltott sávval rendelkezik (2.2. ábra).

Alapvetően az egyszerű, hetero átmenetes cellák egy vegyület-félvezető (pl.: GaAs, InP vagy GaSb) hordozóból, illetve az erre épített többkomponensű anyagból állnak. Az alkalmazási szempontból - a technológia miatt - az egyik leggyakrabban alkalmazott hetero átmenet a Ga_xAl_{1-x}As/GaAs rendszer, ahol a sávdiszkontinuitás függ az összetételtől (Hull, Bean, 1993). Ezekben az anyagokban a kristályok kovalens kötést alkotnak az atomok pedig lapcentrált köbös rácsszerkezetben (más néven cinkblende típusú szerkezetben) helyezkednek el. A bázis két atomból áll. A fény hatására töltések mozdulnak el és a szigetelő vezetővé válik. A jövőt nézve nagyon nagy előnynek látszik, hogy a tilos sáv szélességét tág határok között lehet változtatni, a rétegek összetételének előre jól kiszámítható változtatásával.

2.4.2. Gallium-arzenid alapú napelemek felépítése

A GaAs alapú napelemeknek rendkívül jó az abszorpciós képessége. A tilos sávszerkezet eléri az 1,4 eV-ot. A gallium magas ára miatt főleg az űrtechnikában alkalmazzák őket. Az egykristályos GaAs jóval hatékonyabban nyeli el a Nap

hatékony sugárzási tartományát, mint a kristályos szilícium, így a GaAs napelemhez jóval kisebb anyagvastagság szükséges, mint a szilíciumhoz. 2 μm vastagságú GaAs egykristály abszorpciója 90%-ra megközelíti a végtelen vastagságú anyag abszorpcióját (*Farkas, 2003*). Ezért nagy a csábítás a hétköznapi használatra is. További lendületet ad, hogy már csekély erőfeszítéssel is elérhető a 30% hatásfok (*Green et al., 2011*). Ezt a határt viszont már csak összetett, úgynevezett többsávú eszközök használatával léphetjük át (*Honsberg et al., 2006., Liang et al. 2012*). Ennek a módszernek határt szab a különböző összeintegrálható félvezetők véges száma és ezek tiltott sáv szélessége. Erre a problémára különféle nanostruktúrák (kvantum völgyek MQW és kvantumpöttyök) alkalmazásával kapunk megoldást (*Chen, Bhattacharya, 1993*).

A kvantumvölgyeket tartalmazó többréteges napelem cellákkal az alagúteffektus kihasználásával 40% feletti hatásfok (*Fara et al., 2010*) érhető el (2.22. ábra). Itt lényegében két különböző tiltott sáv szélességű anyag felhasználásával más-más szélességű kvantumgödröket hozunk létre (*Barnham, Duggan, 1990*). A lehetséges energiaállapot a potenciálgödrökben a potenciálgátak távolságával állítható be.



2.22. ábra. A napelem cella hatásfoka növelhető többszörös kvantumvölgyek (a.) és kvatumpöttyök (b.) alkalmazásával (*Nemcsics, 2011*)

Ezen napelemek jó hatásfokát felülmúlják a kvantum pontokat tartalmazó napelemek. Itt a félvezető szerkezetben a kvantum pontok segítségével egy belső sávot hozunk létre, a tiltottsáv belsejében (*Nozik, 2002, Marti et al., 2002*).

Ez a struktúra a köztes sávoknak megfelelő kisebb energiákon is abszorbeál, nemcsak az alapfélvezetőknek megfelelő energiaszinteken. Optimális napenergia konverzió esetén, a hatásfok 60% felett van (*Marti et al., 2006*). Az ilyen félvezető napelem struktúrák molekulasugár epitaxiával (molecular beam epitaxy, MBE) készültek.

2.4.3. Gallium-arzenid és rokon anyagok technológiája

A GaAs egykristály húzásra két eljárást használnak. Az egyik, az úgynevezett LEC (Liquid Encapsulated Chochralski). A másik, a HB (Horizontal Bridgeman) módszer. Mindkét esetben a kristályhúzás folyadékfázisból történik.

A LEC eljárásnál az úgynevezett oltókristályra, az olvadék programozott hűtésével kristályosítanak. Az oltókristályt lassan húzzák függőleges irányban és forgatják. Eközben hengeres öntecs keletkezik a védő-olvadékkal eltakart (B₂O₃) GaAs ömledékből. A védő réteg megakadályozza a GaAs termikus bomlását (tehát az illékony komponens (As) távozását). A módszer előnye, hogy az öntecs keresztmetszete kör, hátránya a magas diszlokáció sűrűség, mely a viszonylag nagy mechanikai feszültségből ered.

A HB eljárásnál, a vízszintesen elhelyezett zárt tégelyben lévő magkristályhoz kristályosítják a GaAs-et, egy olvadáspontot érintő hőmérsékletprofil változtatásával. Az eljárásnak a hátránya, hogy az öntecs a csónak alakját veszi fel, illetve a reprodukciós képessége is alacsonyabb. Ellenben a HB eljárás előnye, hogy a diszlokácó sűrűség alacsonyan tartható.

Ahogy azt az előző fejezetben is említettük, a hatásfok tovább megnövelhető különféle nanostruktúrák alkalmazásával (Schaff et al., 1993, Ji et al., 2004, Masui et al., 2010). Az így készült napelemek technológiájára egy jó példa a Bankok-i Chulalongkorn Egyetem munkatársainak kísérlete (Suraprapapich et al., 2006). A kutatók a molekulasugár epitaxia (MBE) segítségével InAs kvantum pontokat növesztettek önszerveződő módon, p-GaAs hordozón. A buffer réteg elkészülte után szintén az önszerveződést kihasználva több réteget növesztettek egymásra, alacsony növesztési sebességgel (0.01 ML/s), 500 °C hőmérsékleten. Ennek következtében jó minőségű és nagy pontok keletkeztek. Ezt követően erre egy n-GaAs fedő réteg került, amit egy széles tiltott sávú n-GaAlAs réteg követett. Ennek eredményeként a 2.23. ábrán látható módon három kvantum pontokat tartalmazó réteg került egymásra a p-n heteroátmenetben (Suraprapapich et al., 2006). A leírás szerint a fedő réteg, valamint a hordozó növekedési rátájának és hőmérsékletének ellenőrzésével tartották kézben a kvantum pontok méretét és sűrűségét. Ennek segítségével tudták elérni, hogy a nanostruktúrában az általuk kívánt kvantált energiaszintek megjelentek.



2.23. ábra. Egy kvantum pontokat tartalmazó heteroátmenet felépítése

Egy másik lehetséges megközelítés, egy kínai kutatócsoport látszólag egyszerű, de mégis nagyon szellemes ötlete volt, akik a III-N típusú nanostruktúrákat tartalmazó napelemeket tanulmányozták. Ők a 2.24. ábrán látható olyan kocka alakú GaN kvantum pontban gondolkoztak, amely egy nagyobb Al_{0.2}Ga_{0.8}N kvantum pontban van benne (*Weng et al., 2011*).



2.24. ábra. Kocka alakú GaN kvantum pont

Ennek a megközelítésnek az a nagy előnye, hogy a vele történő számítógépes szimulációs kísérletek könnyebben megoldható feladatot jelentenek társaihoz képest.

2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A szakirodalmat széleskörűen áttekintve, annak elemzése során arra a következtetésre jutottam, hogy nemzetközi szinten a nagy hatásfokú napelemek felépítésénél az elsődleges cél az, hogy a nap sugárzás legtöbb energiát tartalmazó spektrumtartományában technológiailag optimalizálva megkeressék több hullámhossz értékhez a neki megfelelő tiltott sávú anyagot, ahol a foton az energiáját optimálisan át tudja adni.

Az anyagösszetétel kiválasztásakor a jó hatásfok érdekében olyan anyagokat kell keresni, amelyben az elektronok a vezetési sávból a vegyiértéksávba gyakorlatilag impulzus veszteség nélkül tudjanak átkerülni, mert a foton impulzusa nagyságrendekkel kisebb az elektron impulzusánál. Ezáltal csak olyan félvezetők jöhetnek számításba, ahol a vezetési sáv alja és a vegyérték sáv teteje azonos elektronimpulzusnál van, azaz direkt sávú legyen a félvezető.

Az anyagösszetétel keresésében nagyon nagy segítséget jelentett az a megállapítás, hogy egy LED struktúra ugyanolyan aktív hullámhossz tartományban működő detektorként is alkalmazható (*Rakovics, Réti et al., 2003*), azaz a fénykibocsátás és fényhasznosítás problémái egyenértékű módon merülnek fel és kielemezhetők. Az energiaátalakítás probléma körén túl az anyagösszetétel által megszabott kiszerelési feladatok is egyenértékű módon jelentkeznek, illetve a született megoldások kölcsönösen átültethetők.

A szakirodalom elemzése során olyan további következtetésre is jutottam, hogy például egy nagy hatásfokú GaAs napelem alapanyaggal történő kísérlet esetén több fontos lépcső is hiányzik annak közvetlen kontroll alatti, nagy biztonsággal és jó hatásfokkal történő előállításához.

A hiányzó lépcsők a következők:

- az olyan megkérdőjelezhetetlen nemzetközi etalonra visszavezethető optikai minősítési lehetőség, amellyel egyrészt a gyártás során bizonyos fázisokban a fázistermékek a legrövidebb úton optikailag kiértékelhetőek, ezáltal sikeresebbé téve egy új napelem előállítási kihozatalát, másrészt az elkészült új napelem esetén azonnal optikailag visszajelzést szolgáltatnak, ami megbízhatóan elősegíti a mindenkori optimális napelem hatásfok elérését,
- az új napelem kialakításához szükséges nagy bonyolultságú rendszertípusnak olyan modellje, amelynél nagy pontossággal és nagy megbízhatósággal a kísérleti mintákra érkező molekulák száma kézben tartható, ezáltal lépésről lépésre követhető az elméletileg levezetett molekulaépülési folyamat, illetve mindig visszakereshetővé válik az attól való eltérés is,
- az olyan számítógépes irányítási algoritmus, amely segítségével egy nagy biztonságú slip nélküli rendszerrel a mintaszelet és a párologtató anyagok

kombinációjából egy tetszőleges félvezetőfajta állítható elő oly módon, hogy a kísérleti mintákra érkező molekulák száma minden fázisban optimális legyen,

 egy figyelő algoritmus, amely az új félvezetőfajta kialakítása közben adódó vis major esetek számát minimalizálja, illetve végső esetben kivédi a nagy bonyolultságú molekulasugár epitaxiás rendszerek vákuumtechnikailag végzetes károsodását, valamint automatikusan menti az MBE nagy gondossággal kialakított vákuumtechnikai adottságait.

A felsorolt hiányok részbeni pótlására, valamint kiszélesített spektrális tartományon történő energiaátalakításokra tettem kísérletet a dolgozatom megírása és a tézisek megfogalmazása során. A kiszélesített spektrális tartományon működő energiaátalakítók jól megfogható megoldásokat nyújtanak a hivatkozások alapján más kutatóknak is, továbbá a nagy hatásfokú napelemek további előrelépését segítik elő, másrészről pedig elérhetővé válik a napelemek optimális hatásfokkal történő előállítása.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben 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.

Az első lépéseket a világító félvezetők optikai vizsgálatainak kifejlesztésében tettem *(Martin, Réti et al., 1990)*, hogy segítségükkel biztosak legyenek az alapok a későbbi LED fejlesztés összehasonlító méréseihez (3.1. ábra).



Kontroll LED

3.1. ábra. LED összehasonlító mérés kisméretű integráló gömb segítségével

A kis átmérőjű (50 mm) integráló gömb gyors és a kalibrált detektor alkalmazásának köszönhetően hiteles adatot tudott szolgáltatni az új fejlesztésű LED-ből kijövő fény összteljesítményéről. Az ábrán látható kontroll LED pedig lehetőséget biztosított bármely korábbi, vagy más gyártótól származó eszközzel történő összehasonlításhoz.

Az első bíztató eredményeket az infravörös tartományban világító InP/InGaAsP összetételű heteroszerkezettel sikerült elérni (*Rakovics, Réti et al., 2002*). Létrehozására a félvezető heteroszerkezetek előállítására alkalmas epitaxiás módszerek közül a gyors és költségtakarékos folyadékfázisú epitaxia (Liquid Phase Epiaxy) volt a célra vezető eljárás.

A nagy hatásfok elérése szempontjából a szakirodalmi áttekintés fejezetben összegyűjtött információk birtokában a másik ígéretes irány a GaAs-alapú napelem struktúrák kutatása. Létrehozása azonban nem egyszerű feladat. Nagyon vékony, kontrollált vastagságú molekula rétegeket kell egymásra építeni, ami legbiztosabb módon molekulasugár-epitaxiás berendezéssel végezhető. Ezért az alpontokba azokat az ismereteket gyűjtöttem össze, amelyek segítségével egy erre alkalmas berendezés a dolgozatommal párhuzamosan olyan szinten valósulhatott meg, amelynél téziseim jelentős hányada speciális alkalmazásként már felhasználásra kerülhettek. Ezáltal azokat a lépéseimet is bemutathatom, amelyek során a molekulasugár-epitaxiás berendezéssel a folyamat állandó megfigyelése mellett ténylegesen létrehozhatóvá válik egy jobb hatásfokú napelem alapanyaga.

Minden új félvezető kifejlesztésekor elengedhetetlen fontosságú a fejlesztés fázisonkénti ellenőrzése. A fejezet második része az ellenőrző módszereket taglalja kibővítve olyan megoldásokkal, amelyek általam lettek továbbfejlesztve.

Bemutatásra kerül egy olyan műnap tesztkészülék átalakítás is, amely homogenitásán az általam készített megvilágításmérővel lehetett bizonyíthatóan javítani és ezáltal az elkészült napelemek minősítése korrektebbé válhatott.

3.1. 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 folyadékfázisú epitaxia során az egykristályos hordozóra az egykristályos réteg leválasztása magas hőmérsékleten (InGaAsP~ 600°C) telített oldatból történik. Az olvadékok mozoghatnak kör alakú pályán, vagy egyenes vonalban is, ahogy az MTA MFA-ban (3.2. ábra).



3.2. ábra. Folyadékfázisú epitaxiás berendezés az MTA MFA-ban
Lineáris, a körpályánál egyenletesebb sebességgel egy olyan grafit csónak együttest juttathatunk be a reaktor térbe, ami két önállóan is mozgatható részből áll. Az egyik részben a hordozó helyezkedik el, a másikban pedig elválaszható módon az olvadékok. A csónak együttes grafitból készült a jó megmunkálhatósága és hőtágulási együtthatója miatt. Továbbá számunkra különösen fontos tulajdonsága még, hogy nem szennyezi az olvadékokat.

A kályha anyaga és kialakítása szintén nagy körültekintést igényel. Az InP hőbomlásra való hajlama miatt az MFKI-ban egy kis hőtehetetlenségű, vékony aranyréteggel bevont üvegfalú kemence készült, ahol a hőátadásban a legnagyobb szerepet a hősugárzás játsza és ezáltal vált gyors működésüvé. A vékony aranyréteg a hővisszaverése által egyrészt a termikus egyensúlyt szolgálja, másrészt kellően átlátszó ahhoz, hogy a reaktorban zajló folyamatok is figyelemmel kísérhetők. Ahhoz, hogy a reaktor gyorsan lehűthető legyen és ezáltal az adalékok káros diffúziója kellő mértékben lecsökkenhessen, a kályha a reaktor cső mentén visszahúzható. Ezzel a kályha mozgatási lehetőséggel leegyszerűsödnek és ugyanakkor felgyorsulnak további növesztési ciklusok, heterostruktúrák megvalósulása.

A folyadékfázisú növekedés közel egyensúlyi körülmények között játszódik le, viszont a rétegnövekedés sebessége eltérhet és ezt kell lekövetni a kályha nagy figyelmet igénylő mozgatásával. Az eltérés a hordozó kristályfelületének orientációjától függ (*Sangster, 1962*). A növekedési sebesség figyelése az aktív réteg vastagságának 50 nm alá csökkentésével válik igazán fontossá. Ebben a tartományban az anyag sávszerkezete sok pozitívumot hozva megváltozik (*Dingle et al., 1975, Esaki, Chang, 1974*), a töltéshordozók mozgása két dimenziós lesz.

A hullámhossz az aktív réteg vastagságával széles tartományban hangolhatóvá válik (*Holonyak et al., 1978*).

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

3.2. 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, (3.3. ábra) növeszthetők (*Réti, Nemcsics, 2012; Herman, Sitter, 1984*). A berendezés segítségével nagyon pontosan meghatározható, hogy milyen heteroszerkezetekkel érdemes, lehet, illetve kell foglalkozni.



3.3. ábra. Egy molekulasugár-epitaxiás berendezés kívülről és belülről

Ennél az eljárásnál a rétegnövesztéshez, a nagy <u>szabadúthossz</u> és a <u>réteg tisztasága</u> miatt ultra nagy vákuum (ultra-high-vacuum, UHV) szükséges. A molekulaforrások (az ún. Knudsen-cellák) a mintatartóra vannak irányítva, hőmérsékletük változtatásával a részecskeáram szabályozható. A III-V anyagok esetében ez a leválási hőmérséklet általában 200–550 °C között változik.

A többi eljáráshoz képest, az MBE eljárásnak számos előnye van (Kálmán és tsai, 2009):

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

Az MBE berendezéseket a rétegnövesztés irányítottságának megfelelően manapság a 3.3. ábrán látható 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 3.4. ábrán.



3.4. ábra. A rétegnövesztés folyamatának szemléltetése (*Réti, Ürmös, 2012*)

Az ábrán jól nyomon követhető még a rétegnövesztés folyamata is. Az egyik elengedhetetlenül fontos feladata ennek a folyamatnak a minél pontosabb nyomon követése és megfelelő időben történő leállítása.

A fizikai körülmények egyszerűbb leírása érdekében a 3.5. ábrán is a rétegnövesztés szempontjából már kiválasztott klasszikus, vertikális elrendezésű MBE sematikus rajzolata látható (*Réti, Ürmös, 2012*).



3.5. ábra. A rétegnövesztést vertikálisan végző MBE berendezésének felépítése

A 3.5. ábrán látható berendezés három fő részből áll. A balra lévő első zsilipkamrában 10^{-7} (10^{-8}) mbar nyomás uralkodik. Segítségével a vákuum teljes megszüntetése nélkül, illetve a rendszer háttérszennyezésének minimalizálásával egy zsilipajtón, más néven tolózáron keresztül juttatható be a minta a második kamrába, a főkamrába.

A főkamrában, más néven reaktorkamrában történik a rétegleválasztás, vagy az egyéb struktúranövesztés, atom- illetve molekulasugarak segítségével. Ezeket a műveleteket már nagyvákuumban (10^{-10} mbar) szükséges végezni. Így biztosítható csupán, hogy a részecskék szabadúthossza nagy legyen, ugyanakkor a főkamra háttérszennyezettsége pedig minimális.

A főkamrában a részecskesugarak kibocsátása a mintára irányított effúziós (más néven Knudsen) cellákból történik. A sematikus ábrán látható rendszerben négy ilyen cella van (Ga, As, In, Al). A növesztéshez szükséges molekulasugarak, e cellák fűtésével hozhatók létre. Maga a minta egy fűthető precíziós manipulátoron helyezkedik el azért, hogy a rétegnövesztés mindig optimálisan történhessen meg.

A rendszer harmadik kamrája leginkább a többféle vákuumszivattyúk (turbó molekuláris szivattyú, ion-getter, Titán szublimátor) csatlakoztatására szolgál. A benne uralkodó vákuum gyakorlatilag megegyezik a főkamrában mérhető értékkel.

3.3. 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. Ezért nem használható semmilyen súrlódást gátló kenőanyag sem. Minden mechanikai alkatrész anyagát úgy kell a munkámhoz kiválasztani, illetve kapcsolódásaikat, illesztéseiket úgy kell kialakítani, hogy ne szeghesse meg a tilalmat.

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.

3.3.1. Kis elmozdulással járó mozgatások ultravákuumban

Az ultravákuumot igénylő berendezéseknél történő mozgatások már tervezési szinten is nagy átgondolást igényelnek. Több gyártó is specializálódott arra, hogy vákuumtömör mozgatókat készít alapmozgásokra. A 3.6. ábrán egy ilyen lineáris mozgató és forgató alapelem látható, amelyekkel a szeletmozgatást terveztem a zsilipkamránál.



3.6. ábra. Lineáris mozgató és forgató elem

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 például a felépíteni kívánt MBE, kikerülhetetlenné vált olyan speciális eszköz felhasználása, amellyel akár öt szabadságfokú mozgás is megvalósítható (3.7. ábra).



3.7. ábra. Precízós manipulátor rendszer (Nemcsics, Réti és tsai, 2010)

A 3.7. ábrán egy erre a célra kiválasztott mintatartó manipulátor látható, aminek az 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. Az ábrán látható további elemek rajzai azt mutatják, hogy nem minden feladat oldható meg kész alapelemekből.

A kialakuló új félvezető szerkezete függ a minta hőmérsékletétől, ezért a minta – és így a mintatartó egészének, vagy legalább egy részének – fűthetőségéről kellett gondoskodjak. Emiatt a mintatartó csak olyan anyagból készülhetett, ami akár 550 °C-ig fűtve is teljesíti az ultravákuumban használt anyagokkal szemben támasztott követelményeket.

Ilyen követelményrendszernek eleget téve a 3.8. ábrán látható mintaszelet tartója úgy lett kialakítva, hogy a mintát ellenállás-, vagy elektronsugaras fűtéssel melegíteni lehessen.



3.8. ábra. Fűthető mintatartó befogadó fészek

A 3.8. ábrán jól megfigyelhető az ék formájú megvezető molibdén lemez pár. Ez hivatott biztosítani a loadoló kamrából mozgatóra bontható módon rögzíthető mintatartó pontos helyzetbe érkezését. A biztos kapcsolat érdekében a 3.9. ábrán látható módon a mintatartó papucs kialakítása is követi ezt a formát.



3.9. ábra. Mintatartó papucs felül- és alul nézete

A mintatartóban fedezhető fel az a T formában végződő menetes szár, amely a papucs bontható, de mégis biztos rögzítésére szolgál.

A dokkoló segédelemek anyaga többnyire Al, vagy Mo, amelyek közül a molibdént választottam, mert nem csak a minta 500 ⁰C hőmérsékletre fűtését kell UHV szennyezés nélkül követnie, hanem a hőmozgás ellenére a kapcsolódó elemeknek tartaniuk kell a mechanikai illesztettséget is.

3.3.2. 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. A mágneses kapcsolat rugalmas, ezért a mozgatandó eszközt több esetben a vákuumtérben megvezetik.

A 3.10. ábrán egy olyan mintabevitel látható, ahol a mozgás lineáris sínen történik.



3.10. ábra. MBE lineáris szeletmozgatással

Az egy tengelyű mágnesrudas előtolás megvezetését és beremegés elleni védelmét az UHV kamrában elhelyezett görgősorok biztosítják, a pontos véghelyzeteit pedig mechanikus pozicionálók határozzák meg.

Minden új anyag zsilipelésénél fontos kritérium, hogy a nagy vákuumigény miatt nem maradhat a munkatérben semmilyen szelettovábbító eszköz. Ez a kritérium érvényes a 3.11. ábrán látható megoldásnál is.



3.11. ábra. MBE lineáris és forgatásos szeletmozgatással

Ebben az esetben is a hosszú egy tengelyű előtolás a jól bevált mágneses áttételen keresztül történik, viszont ennél a megoldásnál a mágneses tér fogatásával kerül a minta a végleges pozíciójába. A mágneses indirekt kapcsolat rugalmasságából fakadó beremegés elleni védelmet ennél a konstrukciónál is az UHV kamrában elhelyezett görgősorok biztosítják és a pontos véghelyzeteket ugyancsak a mechanikus pozicionálók határozzák meg.

Mindegyik esetben közös volt az előkészítő kamrából a főkamrába vezető útvonal, amit kiforrottsága miatt mi is követni szándékozunk a következő mozgássorozatokkal:

- minta előkészítése a zsilipkamra terében,
- tolózár nyitása a zsilipkamra (10⁻⁷ mbar) és az ultravákuum-tér (10⁻¹⁰ mbar) között,
- az előkészített minta bevitele az ultravákuum-térbe,
- ott a minta fixálása egy kb. max 500 °C -ig fűthető alaphoz (fészekhez),
- a bevitelnél használt szerkezeti elemek "visszahúzása" a zsilipkamra terébe,
- a nagyvákuum és az ultravákuum terek közti zsilip elzárása,
- a minta kivételekor pedig a folyamat értelemszerűen fordítva zajlik.

A szelettartók végső helyzetbe hozását viszont egyik esetben sem lehet rábízni a rugalmas mágneses kapcsolattal mozgatott elemekre. Ezeket a feladatokat az előző alfejezetben bemutatott finom mozgatókkal kell megoldani.

A precíz mozgatásra egyrészt akkor van szükség, amikor a nagy lengésidejű mintatovábbítóval kell kapcsolatba kerülni a minta átadás - átvételére, másrészt amikor a munkaszeletet a Knudsen cellák fókuszába kell beállítani. Minden speciális igényhez tervezett alkatrésznél megkötés még, hogy a növesztési térben csak nagy tisztaságú anyagokból készített eszközök maradhatnak a párologtatás idejére, ilyen a rozsdamentes acél, nagytisztaságú réz, illetve molibdén. Ellenkező esetben nem hozható létre a megkívánt tiszta tér.

3.4. Ultra nagy vákuum előállítása és mérése

A vákuum legegyszerűbb módon úgy állítható elő, ha egy légmentesen lezárt tartály térfogatát meg kell növelni. Ezáltal a belső nyomás csökken.

A tartály térfogata viszont nem növelhető meg a határtalanul, így a műveletet ciklikusan kell elvégezni: először lezárni a tartályt, majd megnövelni, majd kinyitva összenyomni. Ezáltal a lecsökkentett térfogatban a gáz nyomása meghaladja a külsőt, így az edényt kinyitva, kiáramlik. Ezen az elven csupán a dugattyús vákuumszivattyú működik (kompresszor-elv), de segíti más szivattyú típusok működésének megértését is.

Az adott feladatban szóba jövő vákuumszivattyúk főbb típusai (Bohátka, 2008):

- 1. Gázeltávolításos (ürítéses):
 - a. folyamatos térfogatváltozásos,
 - b. alternáló,
 - c. forgó (rotációs).
- 2. Kinetikus (irányított impulzusátadásos):
 - a. hajtóközeges,
 - b. molekuláris.
- 3. Gázmegkötéses:
 - a. szorpciós,
 - b. krioszivattyú.

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

3.4.1 Az ultra nagy vákuum előállítása MBE rendszereknél

Az MBE rendszereknél az ultra nagy vákuum előállítása több lépcsőben történik. Az első lépcsőben elő vákuumot hoznak létre rendszerint rotációs szivattyúval. A rotációs szivattyú (más néven forgólapátos szivattyú) belső, forgó hengerében egy mozgó szelep található. Működésének alapja az, hogy a leszívandó tér felől (jobb oldali kivezetés) forgás közben beszívja a gázt (az ábrán a szürke terület jelzi a gáz útját), majd azt a bal oldali csonkon kitolja (3.12. ábra).



3.12. ábra. Rotációs szivattyú működése négy fázisban

Működéséhez a szelep jó illeszkedése, és viszonylag nagy nyomás kell. Működési nyomástartománya: $1013 - 10^{-3} (10^{-4})$ mbar. Számunkra előnye, hogy szívósebessége 0,5 – 500 m³/h *(Bohátka, 2008)*. Kenőanyagnak általában olajat használnak, mely feladata egyúttal a tömítés, illetve a hűtés is (3.13. ábra).



3.13. ábra. Rotációs szivattyú felépítése (Bohátka, 2008).

Ez a típus erősen hajlamos a felmelegedésre is a súrlódás és a gázok sűrítése miatt. Üzemi hőmérséklete 80–90 °C. Használata további veszélyeket rejteget olyan munkahelyeken, ahol nincs megoldva a folyamatos energia és hűtővíz ellátás. Feszültség kimaradás esetén ugyanis a szivattyú kenőolaja beszívódhat a korábban gondosan kitisztított, majd kiszivattyúzott munkatérbe. Ismerve a veszélyeket a feladatom megoldása során gondoskodnom kellett ezen esetek elkerülésére egy olyan biztonsági szeleppel, amely feszültség kimaradás esetén rögtön lezárja a szívott oldalt és egyúttal megnyit helyette egy fellevegőző oldalágat.

További alternatíva lehet a jövőben a nagy kopás- és hőállóságú kerámiák egyre szélesebb körű felhasználásával párhuzamosan megjelent olaj mentes száraz rotációs szivattyú beépítése, amit jelenleg a magasabb árkategóriája gátol.

Az MBE rendszerek ultra nagy vákuumának előállításánál a második lépcső rendszerint a rotációs szivattyúval sorba kapcsolt turbómolekuláris szivattyú. Ezek elvét Becker dolgozta ki 1958-ban. Lényege, hogy a forgó és állórészek távolsága ~1mm lett és forgórészként lapátok sorozatát iktatta be. Viszont beépítésekor nagyon elővigyázatosnak kell legyünk, hogy az eszköz ne szippanthasson be darabos szennyeződéseket.

A választásom mégis azért esett erre a típusra, mert precíz felépítéssel nagy kompresszió (levegőre tipikusan $10^{-8} - 10^{-12}$ mbar) és nagy szívósebesség érhető el vele (~5000 l/s).

A sok kis lapáttal rendelkező álló- és forgórészeket a turbinákhoz hasonló elven építik fel (3.14. ábra).



3.14. ábra. Turbómolekuláris szivattyú álló és forgórészének felépítése *(Langer, 2014).*

Ügyelnem kellett a gyártó kiválasztására, mert a turbinalapátokat ő állítja megfelelő szögbe, amitől leginkább függ a szívósebesség. A lapátok adott irányú impulzus átadásával az elszívandó gáz molekuláit az elővákuum oldal felé terelik. A forgórész fordulatszáma átmérőtől függően 15.000 – 90.000 fordulat/perc. Egy turbomolekuláris szivattyú felépítése részletesebben a 3.15. ábrán látható *(Bohátka, 2008).*



3.15. ábra. Turbomolekuláris szivattyú felépítése részletesen

Az ábra bal felében egy turbomolekuláris szivattyú lapátsorainak metszete szemlélteti, hogy az állórészek között a forgó lapátok hogyan terelik a gázokat. Ugyanezen ábra jobb felében egy kétrészes turbomolekuláris szivattyú (TPV 200) néhány alkotó elemét figyelhetjük meg: csapágy (1); motor (2); labirintus kamra (3); rotor (4); szívás csatlakozás (5); forgólapátok (6); állórész (7); olajtartály (8); csapágy olajozása (9); olajvisszafolyás (10); elővákuum vezeték (11); kifűtés (12). Az eszköz legfontosabb jellemzője, hogy csak a molekuláris áramlás tartományában működik, ezért általában első lépcsőként vagy egy rotációs szivattyút, vagy egy dugattyús szivattyút kapcsolnak vele sorba, amelyik már 10^{-2} mbar előállítására képes. A főkamrához a nagy elszívási teljesítménye igény miatt a rotációs szivattyú beépítésére esett a választás. A végvákuumot viszont a különböző gázokra elérhető kompresszió viszony határozza meg. Könnyű gázokra (H2, He) ez a viszony kicsi, ezért közülük a héliumot a későbbiekben tömítetlenségi lyukak behatárolására terveztem használni. Célom egy olyan berendezés felépítése, amelynél végvákuumként akár 5x10⁻¹⁰ mbar is elérhető (feltéve, hogy az elővákuum jobb mint 10^{-2} mbar).

Az MBE-nél azonban még ez az érték sem elegendő, ezért a maradék gázokat harmadik lépcsőként általában megkötik, tehát ennek megoldását is meg kellett találjam.

A gáz megkötése három féle módon történhet:

- 1. adszorpció (a gáz a megkötő anyag felületén kötődik meg),
- 2. abszorpció (a gáz belediffundál a megkötő anyagba),
- 3. kémiai kötés (a megkötő anyag és a gáz között kémiai kölcsönhatás létesül).

Közismert megkötő anyagok: Ti, Ta, Mo, Nb, Zr, Ba, Mg, Al, Th és ezek ötvözetei. Működési elve az, hogy a vákuumtérben levő gázmolekulák nagyfeszültség (5kV) és mágneses tér (0.1 - 0.3 Tesla) segítségével ionizálódnak, majd az ionok a

megkötő anyagból készült felület felé gyorsítva lesznek. Az ionok a titán, illetve tantál fémeket folyamatosan porlasztják (katódporlasztás) és ezáltal mindig friss megkötő felületet hoznak létre. A 3.16. ábrán egy Ti-szublimációs szivattyú felépítése látható (*Bohátka, 2008*).



3.16. ábra. Titán-szublimációs szivattyú felépítése

Az 3.16. ábrán a szivattyú működéséhez elengedhetetlen néhány alkotó elem van megjelölve: Ti ötvözet izzószál (1); hűtött szivattyúház (2); lecsapódott friss Ti réteg (3); a szivattyú alaplemeze (4). Az egyszerű felépítése és ezáltal kevés szerviz igénye miatt ugyan beterveztem ezen szivattyútípus használatát, de gondoskodnom kellett megszakítás mentes vízhűtéséről, fenntartva a lehetőséget cseppfolyós nitrogén használatára is, amivel jelentősen megnövelhető a szívóképesség.

Az MBE berendezéseknél elterjedten használnak még dióda típusú ion-megkötő szivattyúkat is. Ennek működését a 3.17. szemlélteti.



3.17. ábra. Dióda-típusú ion-megkötő szivattyú működése (Langer, 2014)

A szivattyúzás folyamata:

- 1. Ionizáció közben a molekulák szétesnek, az ionok (pozitív és negatív) katódon, illetve anódon megkötődnek (szerves gázok).
- 2. A katódporlasztás során előállított friss fémréteggel történő kémiai kölcsönhatás (getterezés) (O₂, N₂, CO₂).
- 3. A folyamatos katódporlasztás miatt a felületeken megkötött (adszorbeálódott) molekulák befedése (nemesgázok).
- 4. A keletkezett ionok gyorsulva az anód és katód felületébe implantálódnak.
- 5. A semleges molekulák töltéscsere után reflektálódnak és az egyik felületről a másik felé implantálódnak.
- 6. A molekulák felületen történő megkötődése, majd diffúzió a mélyebb rétegekbe (hidrogén).

Folyamatos porlasztás esetén a korábban eltemetett gázmolekulák az úgy nevezett memória-effektusnak köszönhetően felszabadulhatnak, de esetünkben a terv szerint ez az eset csak ritkán fog előfordulni, ezért a jobb vákuum reményében ezt a típust is beterveztem. A megkötő folyamat ugyanis már 10^{-4} mbar-tól működik és végvákuumuk az irodalom szerint *(Bohátka, 2008; Langer, 2014)* jobb lehet mint 10^{-11} mbar.

3.4.2 Az ultra nagy vákuum mérése MBE rendszereknél

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

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

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

3.4.2.1 Abszolút nyomásmérők

A nyomásmérő működési elve egyúttal behatárolja annak mérési tartományát is. A hővezetésen alapuló nyomásmérők fizikai alapja az, hogy a gáz nyomásával együtt annak hővezető képessége is csökken. Közepes nyomásokon (100 mbar - 10^{-4} mbar) a kinetikus energia átadása a molekulák ütközése révén történik. Ebben a tartományban a hővezetés és nyomás között közel lineáris a kapcsolat van. Ezt a kapcsolatot használjuk ki a Pirani vákuummérő rendszerrel (3.18. ábra).



3.18. ábra. Pirani vákuummérő elvi kapcsolási rajza (Langer, 2014)

A Pirani-nyomásmérő érzékelője egy vékony platina vagy wolfram ellenálláshuzal, melyet 100 - 120 °C-os hőmérsékletre kell felfűtsük. A cső nyitott vége kapcsolódik a mérendő térhez, ami a Weastone-híd egyik ágát alkotja. Egy differenciálerősítő detektálja a híd kimenő-feszültségének esetleges változásait és mindig akkora feszültséget ad, amekkora a kiegyensúlyozottsági állapotnak megfelelő szálhőmérséklet beállítására szükséges. A nyomás arányos a fűtött huzalba ütköző molekulák számának és méretének változásával. Ezzel együtt az elvitt hőmennyiség is változik. A hídkapcsolás segítségével tulajdonképpen azt mérjük, hogy mennyi energia szükséges a vákuumban levő ellenálláshuzal állandó hőmérsékleten tartásához. Mérési tartománya elfogadható pontossággal 100 mbar és $5x10^{-4}$ mbar között van. Ezért az elővákuumot ellenőrző mérésnél a sorba kapcsolandó rotációs és turbómolekuláris szivattyú között ezt az eszközt terveztem használni.

A Pirani vákuummérő mérőfejének elvi felépítése a 3.19. ábrán látható.



3.19. ábra. Pirani vákuummérő mérőfejének elvi felépítése (Bohátka, 2008)

A főkamrában a tervezett nagyobb vákuum igény miatt már egy másik, ionizációs elven alapuló mérőeszközre van szükség, melynek mérési tartománya 0.1 mbar és 10⁻¹² mbar között van. Az ionizációs vákuummérők működésének alapja, hogy a

kibocsátott elektronok a maradék gázt ionizálják. Az így keletkezett ionok becsapódnak a negatív töltésű elektródába. A mért áram arányos az ionok által hordozott töltéssel. Ezt az arányosságot használjuk ki a Penning hidegkatódos ionizációs vákuummérőben, ami két elektródából és egy megfelelően elhelyezett mágnesből áll (3.20. ábra).



3.20. ábra. Hidegkatódos (Penning) vákuummérő felépítése (Langer, 2014)

A két elektródára nagyfeszültséget (2-5 kV) kapcsolva a katódból elektronok lépnek ki a vákuumtérbe. Ezek az elektronok a gázmolekulákkal találkozva, ionizálják azokat, s így még több elektron szabadul fel. Az így kialakult ionizációs áram arányos a nyomással. Ez az összefüggés több nagyságrenden keresztül lineáris, ami esetünkben a főkamrának vákuum szempontjából kritikus terének felügyeleti biztonságát szavatolja.

Mi valójában azt a nyomással arányos villamos áramot fogjuk ellenőrzésképpen mérni, ami akkor keletkezik, amikor az elektronok végül becsapódnak az anódba. A Penning vákuummérő felső méréshatárát (kb. 0.1 mbar) az szabja meg, hogy bizonyos nyomás fölött a nagy sűrűségű gázban az elektronok "elvesznek", értékelhető áram mennyiség már nem mérhető. Az alsó határt pedig az határozza meg, hogy a kilépő elektronok tudnak-e annyi molekulát ionizálni, hogy már mérhető nagyságú áramot okozzanak. Ennek segítésére építenek mágnest a Penning mérőkbe. Ezek ugyanis spirális, az egyenesnél hosszabb pályára kényszerítik az elektronokat, így azok több molekulával találkozhatnak. Ez a jelenség győzött meg arról, hogy vele a főkamrában is pontos értéket fogunk mérni.

3.4.2.2 Parciális nyomásmérők, tömegspektrométerek

A vákuummérők csak az össznyomást mérik. Számos esetben, mint a mi kísérleti összeállításunknál is fontos a különféle gázok parciális nyomásainak, a maradékgáz összetevőinek ismerete, hogy milyen további molekulákkal számoljunk a betervezetthez képest. Ehhez a részecskék tömegét meghatározó analitikai módszerre van szükség. Ez a tömegspektrometria vagy tömegspektroszkópia (MS - Mass Spectrometry). Az adott gáz ionjai az elektromágneses térrel való kölcsönhatás során tömeg/töltés hányadosuk alapján

szétválnak. A mérés során a rendszerben lévő maradékgáz tömegspektrumát vizsgáljuk, mely relatív intenzitást ábrázol a tömeg/töltés, vagy tömeg/rendszám hányados függvényében.

A tömegspektrométerek három fő egységből állnak: ionforrás \rightarrow analizátor \rightarrow detektor

- 1. az ionforrás: semleges atomokból, molekulákból ionokat állít elő,
- 2. az analizátor: tömeg/töltés (m/e) szerint szétválogatja az ionokat,
- 3. a detektor: méri az analizátoron átjutó ionáramot amely nA-pA nagyságrendbe esik.

A tömegspektrometriás mérésnek négy alapvető lépése van:

- a. a mintából ionok készítése,
- b. az ionok a különböző tömeg/töltés arány szerinti elválasztása,
- c. az ionok detektálása,
- d. adatgyűjtés, a tömegspektrum felvétele.

A tömegspektrométereket többféle módon is osztályozhatjuk:

- 1. az ionok átlagos repülési ideje szerint (TOF: time of flight),
- 2. elektromos paramétereik alapján pl. kvadrupól, radiofrekvenciás mérő, ioncsapda, megatron, stb.
- 3. mágneses felépítésüknek megfelelően,
- 4. elektrosztatikus adottságuk szerint,
- 5. felbotóképességük alapján,
- 6. önálló, vagy tandem felépítésük szerint (MS/MS, MSⁿ).

Az MTA TTK MFA-ban a kvadrupól tömegspektrométer (QMS-Quadrupol Mass Spectrometer) alkalmazására terjedt el, ezért azt az alábbiakban részletesebben elemzem.

Az eszköz mérőegysége négy párhuzamos, egy képzeletbeli központi tengelytől egyenlő távolságban elhelyezett fémrúdból áll (3.21. ábra).



3.21. ábra. Kvadrupol tömegspektrométer felépítése (Langer, 2014)

Az ionok a forrásból a rudak közötti térbe azáltal repülnek megfelelő sebességgel, hogy megfelelően megválasztott váltakozó (V) és egyenfeszültséget (U) kapcsol rájuk a vezérlő elektronika. Az ionok mozgási pályája függ a tömeg/töltés aránytól, a feszültségek értékétől, valamint a rádiófrekvenciás jel frekvenciájától (ω). (Leggyakoribb paraméterek: $\omega = 1-2$ MHz; U ≈ 1000 V, valamint V ≈ 6000 V).

A paraméterek megfelelő megválasztásával megszabhatjuk, hogy csak egy adott tömeg/töltés aránnyal jellemzett ionfajta pályája legyen stabil a rudak mentén. Lényegében csak ezek jutnak át az analizátoron, míg a többi ion rezgésének amplitúdója folyamatosan nő, ameddig bele nem ütköznek az egyik rúdba. Az U, V és ω szisztematikus változtatásával felvehető a maradékgáz teljes tömegspektruma (3.22. ábra).



3.22. ábra. Egy adott rendszerben lévő maradékgáz tömegspektruma (Langer, 2014)

A kiválasztott Pfeiffer tömegspektrométer esetén nagy segítség, hogy az analizálás szempontjából fontosabb maradék gázok többszörös nagyításban, .részletesebben is megmutathatók, mint az ábrán látható $CH_3 - CO^+$ és környezete.

3.5. MBE berendezéssel napelem számára növesztett rétegek mérése

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.

3.5.1. Ellipszometria

Az ellipszometria egy olyan nagy érzékenységű roncsolás mentes optikai elven történő vizsgálat, amellyel első sorban felületeket, illetve vékonyrétegszerkezeteket minősítenek (Lohner, А TTK 2000). MFA-ban készülő ellipszométernél is a mintát egy többnyire lineárisan polarizált lézer világítja meg, ami onnan visszaverődve többnyire elliptikusan polarizálttá válik. Miután ismertük a beeső fény polarizációs állapotát, megmértük a reflektált nyaláb polarizációjának változását és így kaptunk információkat a minta optikai tulajdonságairól. Abban az esetben, amikor ismertük az anyag dielektromos adatait is, akkor meg tudtuk vékonyréteg vastagságát, szemcseszerkezetét, határozni а mintán lévő határfelületeinek minőségét. A kapott adatok megnyugtató ellenőrzésül szolgáltak a létrehozott ZnO réteg vizsgálatánál, ugyanakkor biztos hátteret jelentenek az új napelem kísérleti rétegeinek ellenőrzés sorozatánál.

3.5.2. Rutherford-visszaszórásos Spektrometria

A Rutherford-visszaszórásos Spektrometria (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS) során 1-5 MeV-os felgyorsított He ionokkal bombáztuk a vizsgált minta szeletet 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 tudtuk meghatározni.

Ez a vizsgálat a minta anyagi összetételének meghatározásán felül az ellipszométerrel mért rétegvastagsági adatok összehasonlítását is lehetővé tette. Ebben az esetben a He ionok beesési szögét kellett változtassuk, hogy további adatokat kapjunk a merőlegeshez képest. Így a mintában megtett hosszabb úttal arányos energiavesztésből meg tudtuk határozni a kísérleti réteg vastagságát és összevetni az ellipszométerrel mért értékkel.

3.5.3. 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 tapasztaltunk.

A kísérleti minta felületét egy elektronágyú fókuszált sugarával végigpásztáztuk. A visszaszórt elektronokat és röntgensugarakat különböző detektorokkal érzékelve, majd hozzárendelve az elektronok becsapódási helyeinek koordinátáit, egy jól használható néhány nm felbontású képet tudtunk kapni a felső réteg

szemcseszerkezetéről, szennyezők helyéről, mennyiségéről és a számunkra fontos réteg vastagságáról.

Többszörös letapogatást összegezve közel 100 000-szeres nagyítást is el tudtunk érni anélkül, hogy a minta az elektronbombázástól megsérült volna.

A mért adatokból 10 nm felbontással még a minta felületének anyagi összetételét is meg tudtuk határozni. Ez a meghatározás csupán egy mikrométer mélységig volt hiteles, viszont a jövőt tekintve minden új kísérleti réteg kialakításakor nagyon sok tanúságot fog jelenteni.

A 3.23. ábra *(Réti, Nemcsics, 2012)* szemlélteti, hogy egy kísérleti nanostruktúráról a pásztázó elektronmikroszkópia segítségével milyen plasztikus képet nyerhetünk.



3.23. ábra. Kísérleti nanostruktúra pásztázó elektronmikroszkópia segítségével nyert képe

3.6. Napelemek optikai minősítése és a műnap

A több évtizedes múltra visszatekintő világűrkutatás, valamint a polgári és katonai célú mesterséges égitestek energiaellátása egyre több és egyre jobb minőségű napelemek kifejlesztését és gyártását tette szükségessé. A beszállítók tiszta versenyhelyzetének megteremtése érdekében a NASA, többek között az amerikai Mérésügyi Hivatal (NBS) ajánlására támaszkodva már 1977-ben fontosnak tartotta lefektetni azokat a fotovoltaikus mérési eljárásokat (*NASA. 1977*), amelyek adatait elvárta a gyártóktól. Figyelemre méltó, hogy mindjárt a központi laboratóriumig visszavezethető referencia elem megkövetelése után a következő kikötés a vizsgált fényelem hőmérsékletére (28 ± 2 ^oC), illetve a besugárzás nagyságára (1000 W/m²) vonatkozik. A minősítési definíciók egyenleteit tekintve azok jelennek meg követendőkként, amelyeket én is megjelöltem értekezésem első felében a napelemek elméleti alapegyenleteiként (2.2), (2.3), (2.4).

Ahogy az energia szűkösség az Európai Unióban is megnövelte a keresletet a napelemekre, úgy szigorították tovább az amerikai előírásokat a minőség javítása érdekében. Így Európában a Standard Test Conditions (STC) vizsgálati feltételeit felváltották az European Solar Test Installation (ESTI) előírásai, amik a legszigorúbbak a világon. Ezen az útvonalon haladva sikerült némi előrehaladást elérnem az optikai minősítések egyik irányában. Az alábbi alpontokban bemutatok néhány műnap típust, amelyek közül az általam megfelelőbbnek ítéltnek a javítási lépéseiről is beszámolok.

3.6.1. Műnap halogén izzókkal

A műnap eredeti célja, hogy valamilyen szinten leutánozza a Nap sugárzását mesterséges körülmények között. A 3.24. ábrán jól látható, hogy az atmoszférikus térben mért napsugárzás alig tér el egy 5800 ⁰K hőmérsékletű fekete testétől.



3.24. ábra. A World Metrological Organization által az atmoszférikus térben mért Nap és az 5800 ⁰K hőmérsékletű fekete test spektruma

Ezt a színhőmérsékletet és spektrális jelleggörbét legjobban halogén izzólámpák segítségével lehet megközelíteni. Ezért irányult elsődlegesen a figyelmünk az ilyen fényforrással rendelkező megoldásokra. A napelem felületének kellő energiával történő egyenletes megvilágításához vagy egy meglehetősen távolról sugárzó, illetve egy fényszóró elem (egyben fényintenzitás csökkentő) beépítésével közelebbről világító nagy teljesítményű központi sugárzóra van szükség, vagy egy megvilágító síkra sűrű mátrixban elhelyezett több kicsi izzólámpára. Mi ez utóbbi energia és hely takarékosabb megoldás mellett döntöttünk, amikor a 3.25. ábrán látható halogén lámpákkal felépített műnapot vásároltuk meg az MTA MFA keretein belül.



3.25. ábra. Halogén lámpás napszimulátor megvilágító síkja

Ezáltal aránylag egyszerűen el tudtunk végezni egy 1500 x 750 mm nagyságú napelem vizsgálatát is. A mérőfiókon helyet kaptak a különböző napelem alapanyagból készült, központi laboratóriumig visszavezethető referencia fényelemek is, amelyek a mérés során ugyan akkora besugárzásban részesültek. (3.26. ábra).



3.26. ábra. Napszimulátor napelem tartója referencia fényelemekkel

A homogén megvilágítás megvalósítása utáni kritikus kérdés, hogy miként valósul meg az erős hősugárzás ellenére a napelemek szobahőmérsékleten tartása. Ezt a feladatot a napszimulátor gyártók általában kétféleképp oldják meg. Az egyik esetben, mint amilyen módon a mi berendezésünk is működik a napelem tesztparamétereinek felvételével párhuzamosan mérik annak felhevülési hőmérsékletét is és a kapott paraméter adatokat megszorozzák a hozzá tartozó hőfoknak megfelelő korrekciós tényezővel, amit a napelem tartóra szerelt referencia fényelemmel a saját laboratóriumukban kimértek.

Igényesebb, viszont sokkal drágábban kivitelezhető tesztelések esetén a kimérendő napelem hátsó felületére egy hűtőpanelt rögzítenek teljes felület mentén jól tapadó hővezető anyag segítségével és a napelem paramétereit csak akkor kezdik el mérni, ha az előírt hőmérsékleten már beállt a termikus egyensúly.

3.6.2. Műnap xenon lámpával

Az olyan laboratóriumokban, mint a miénk, 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 (3.27. ábra).



3.27. ábra. Napszimulátor xenon fényforrással (Oriel Product Training, 2014)

Ez esetben nem szabad elfeledkeznünk a sugárzás spektrális képében megjelenő a 3.28. ábrán is jól látható xenonra jellemző kiemelkedésekről.



3.28. ábra. A xenon fényforrás spektruma (Oriel Product Training, 2011)

Szerencsére a legtöbb eddig tesztelt napelem spektrális görbéje a maximumig monoton növekvő, majd csökkenő volt. Így összehasonlító mérések segítségével kielégítő mértékben ki tudtuk ejteni a xenon lámpa tüskéiből eredő hibákat.

3.6.3. 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, amivel csupán 10 mm átmérőjű felületen tudtuk csak elérni az előírt besugárzási teljesítményt a rendelkezésre álló LED elemekkel.

3.6.4. Műnapok minőségi javítása

Az eddigiek során két fajta műnap javítására tettem kísérletet. Az egyik esetben a kisebb felületeket tesztelő xenon lámpás műnap egyedüli hátrányát a sugárzás spektrumának sok csúcsos jellegét igyekeztem korrigálni. A tüskék teljes kiküszöbölése lehetetlen vállalkozásnak tűnt, viszont egyes jelentékeny kiugrás elsimítása már nem. Sávszűrőket készítettem először a SCHOTT cég színes üvegjeiből, amik a tűhegyes csúcsok környezetét is elnyomták. Így a lézertechnikában bevált fémgőzöléssel készült szűrők mellett döntöttem, amik már sokkal kisebb sávot takartak le, viszont ahhoz, hogy sávjukban maradjanak állandó hőmérsékleten tartásukról kellett gondoskodni. Bár ez az eljárás néhány kiemelkedőbb csúcs esetén nagyon hatékony volt, a teljes spektrumot tekintve nem hozott akkora eredményt, hogy az egy gyártási sorban megállta volna a helyét.

Eredményesebben sikerült viszont a halogén lámpás műnap javítása. Első lépésként az MTA MFA laboratóriumában felállított angliai műnap szimulátor, az Energy Equipment Testing Service Ltd. cég, PVMT 11250 modul mérő berendezésének eredetileg beépített Philips 3000 ⁰K színhőmérsékleten sugárzó hidegtükrös lámpáit Solux 4700 ⁰K magasabb színhőmérsékleten sugárzó hidegtükrös lámpákra cseréltük ki. A számottevő spektrális javítás az újonnan beépített lámpák kisebb sugárzási kúpszöge (60° helyett 38°) miatt jelentő homogenitás romláshoz vezetett. A romlás kiküszöbölésére a megoldás egy színháztechnikában használatos kis abszorpciójú, jó fényszóró képességű fólia volt. A legkedvezőbb helyét úgy kerestük meg, hogy közben a homogenitás 3.29. ábrán látható módon ellenőriztük (*Berkó, Réti, 2006*).



3.29. ábra. Homogenitásmérő rendszer fotója és vázlata

A fényvetület homogenitása egy plotter mozgó fejére szerelt 2 x 2 mm nagyságú szilícium detektorral mértük ki úgy, hogy mérési pontok a napelem síkjában egy négyzetrácsban helyezkedtek el.

A leírt technikával olyan jól sikerült a fóliát a műnapba beépítsük, hogy ezáltal a napelem megvilágítás jelentősen homogénebb lett (3.1. táblázat). Az eredmények jobb szemléltetése végett három oszlopban a világítástechnikában jól ismert $e(0) = E_{av}/E_{max}$, $e(1) = E_{min}/E_{av}$ és $e(2) = E_{min}/E_{max}$ egyenletességi mutatókat is feltüntettük.

	Megvilágítás mérések [lux]					[lux]	Homogenitás mérések			
variáció		mérés 5 ponton			on	Átlag	e(0) e(1) e(2			
Solux ajtó fent fólia nélkül, tetővel	309	309	309	308	309	308,8	0,9547	0,9495	0,9064	
Solux ajtó fent fólia nélkül, tető nélkül	311	310	311	311	311	310,8				
Solux ajtó lent fólia nélkül, tetővel	282	282	283	282	282	282,2	0,9511	0,9524	0,9058	
Solux ajtó lent fólia nélkül, tető nélkül	282	282	281	282	281	281,6				
Solux ajtó fent fóliával, tetővel	221	221	221	222	221	221,2	0,9742	0,9751	0,9500	
Solux ajtó fent fóliával, tető nélkül	220	220	219	220	220	219,8	0,9761	0,9786	0,9552	
Solux ajtó lent fóliával, tetővel	213	212	212	213	213	212,6				
Solux ajtó lent fóliával, tető nélkül	210	210	211	210	211	210,4				
Philips ajtó fent fólia nélkül, tetővel	317	317	316	316	317	316,6	0,9643	0,9551	0,9209	
Philips ajtó fent fólia nélkül, tető nélkül	316	315	316	315	316	315,6				
Philips ajtó lent fólia nélkül, tetővel	292	292	291	291	291	291,4	0,9431	0,9371	0,8838	
Philips ajtó lent fólia nélkül, tető nélkül	293	292	291	292	292	292				
Philips ajtó fent fóliával, tetővel	222	222	223	222	222	222,2	0,9809	0,9808	0,9621	
Philips ajtó fent fóliával, tető nélkül	219	219	218	219	219	218,8	0,9626	0,9851	0,9483	
Philips ajtó lent fóliával, tetővel	212	212	212	211	213	212				
Philips aitó lent fóliával, tető nélkül	211	211	210	212	211	211				

31	táblázat	Sugárzási	homogenitás	eredménvei a	műnanhan	(Berkó	Réti '	2006)
J.I.	taulazat.	Sugarzasi	nomogenitas	cicumenyer a	munapuan	(DUINO,	KCII, A	2000)

4. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatom azokat az eredményeket, melyekkel világító félvezetők energiaátalakítási sikereiből kiindulva kidolgoztam egy olyan nagy hatásfokú kiszélesített spektrumtartományban működő félvezető alapú napelem típusnak gyártási módszerét, amely az elkészítési fázisokban is kontrollálható módon egy molekulasugár epitaxiás berendezés (MBE) felhasználásával készülhet. A munkám során azt a jelenséget használtam fel, hogy szilárdtest félvezetőknél az energiaátalakításban szerepet játszó fény frekvenciáját a Planck-egyenlet alapján jó közelítéssel a LED anyagának tiltott sáv energiaszélessége szabja meg, ezért a LED ugyanolyan frekvenciájú detektorként is használható (*Rakovics, Réti et al., 2003*).

Azáltal, hogy a fénykibocsátás és fényhasznosítás problémái egyenértékű módon merülnek fel, így a kitűzött feladat megközelítését megfordítva nagyon nagy arányban fel tudtam használni azokat az eredményeket, amelyeket korábbi nagy hatásfokú fényemittáló félvezető eszközök (lézerek) készítésénél szereztem. Ezek alapján az anyag kiválasztása során már csak a direkt félvezetők jöhettek szóba. A kiválasztott heteroszerkezetben, illetve azon kívül a fény útjának optimalizálása is bejárt úton történhetett. Az elkészült félvezetők elektromos csatlakozó felületeinek kialakításainál, valamint kiszerelésénél is nagyon hasznosnak mutatkoztak a LED előállítási tapasztalatok.

A munkám további szempontjai az új napelem elkészítési fázisainak kontrollálhatósága volt, valamint olyan kezelő felület kialakítása, amely mind az ipari alkalmazás biztonságának és laboratóriumi alkalmazás precizitásának követelményét ötvözi, mind a laboratóriumi kísérletek kívánalmait kielégítik.

4.1. Optikai minősítő módszer a napelem gyártás fázisaira

Az Európai Unióban a legszigorúbbak a napelemekre vonatkozó előírások a világon, mégsem szándékoznak megkötni a fejlesztők kezét. A kutató laboratóriumokra van rábízva, hogy milyen saját követelményrendszerrel, munkafázisonkénti tesztelésekkel próbálja elérni az újabb termékei hatásfokának növekedését. Ezek ettől fogva az adott laboratórium, vagy gyártó üzem műhelytitkai közé fognak tartozni, amikről legfeljebb véletlenszerűen tudhatunk meg valamit. Dolgozatommal részben egy ilyen hiányt szeretnék pótolni és az elért eredményekkel segíteni más napelem, vagy LED készítőnek legalább néhány munkafázisuk javításához.

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 olyan technikai eszközökkel bővítettem ki, amelyekről részletesebben az alábbi fejezetek számolnak be. A napelem elkészítési fázisok optikai vizsgálata esetére egy olyan számítógép vezérelt lépéssorozatot valósítottam meg, ami meggyorsítja a mérést és megháromszorozta a visszamérési pontosságot.

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. A mérés blokkvázlatát a 4.1. ábra szemlélteti.



4.1. ábra. A napelem minta mérésének blokkvázlata

Az 500W-os halogén lámpa fénye a kettős monokromátorrá átalakított Cary 17 spektroradiométer belépő résére van leképezve. A monokromátor be és kilépő rése 0,2 mm-re volt állítva, ami a felbontóképességet a látható színképtartományban 4 nm-re, a közeli infravörös tartományban 10 nm-es átlagértékekre korlátozta, mert a kettős monokromátorba beépített prizma diszperziójának megfelelően a felbontóképesség függ a hullámhossztól. A monokromátor kilépő rése után egy vezérelt fényzár segítette a detektorok sötétáramának kiküszöbölését. A továbbjutó lencse által párhuzamosított fénysugarat egy fényosztó egymásra merőleges irányokra osztotta: a sugárzás egyik fele a vizsgálandó napelem mintára irányult, míg a sugárzás megtört irányú 5% hányada 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 400-1100 nm-es hullámhossz tartományban Si (p-i-n) dióda, míg az 1100-1800 nm-es tartományban Ge detektor volt az etalon detektor. A detektorok jeleit egy kis zajú erősítő, majd egy MTA MFKI-ban kifejlesztett vezérlő és adatgyűjtő fogadta, ami két, egyenként 12 bites párhuzamos adatvonalon tartotta a számítógéppel a kapcsolatot, továbbá a monokromátor hullámhossz állító léptető motorját utasította a következő hullámhossznak megfelelő lépésszám elvégzésére. A vezérlő feladata volt még a léptetőmotor lépéskiesésének figyelése, valamint a monokromátor hullámhossz tartományának szélső helyzeteit jelző mikrokapcsolók figyelése.

A módszerhez tartozik, hogy a minimális jel/zaj viszony érdekében a mérés csak a monokromátor hullámhosszát állító léptetőmotornak mindenkori álló helyzetében történhet. Ezalatt az idő alatt a háromszoros visszamérési pontosság érdekében 100 jelperiódus integrálása történik, annak mátrixba eltárolása, majd csak ezután léphet tovább a motor lép-mér üzemmódban a következő hullámhosszra. A mérési tartomány, a hullámhossz lépésköz, valamint a pontonkénti mérések száma a mérésigényeknek megfelelően át is programozhatóak. (4.2. ábra).



4.2. ábra. A mérési opciók beállítása két megjelenítő ablakban

A mérési pontok számát az etalonhoz mellékelt mérési adatsor határozza meg, ami esetemben 10 nm-es hullámhossz megállásokat jelentett.

A vezérelt mérési ciklusok befejezése után a feldolgozó algoritmus összeveti a mért értékből adódó mátrixot a referencia értékekkel és ezután rajzolja ki a vizsgált minta 4.3. ábrán látható spektrális görbéjét, amiből a napelem pillanatnyi munkafázisa értékelhető.



4.3. ábra. Egy mérési sorozat eredménye

A 4.4. 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.



4.4. 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. Az rajta átjutó fényt pedig az ismert érzékenységi karakterisztikájú etalon fogadja. A szűrő transzmissziós vizsgálatakor a mérőprogramot úgy kellett módosítani, hogy két egymás utáni mérési folyamatra van szükség azonos léptetési beállítások mellett: egyet szűrő nélkül, majd a vizsgálandó szűrővel. A transzmissziós görbét a két mért adatsor különbsége szolgáltatja. Ebben az összeállításban is az etalon detektor jeleit egy kis zajú erősítő, majd a vezérlő és adatgyűjtő fogadja, amelynek vezérlési funkciói a napelem mintát mérő üzemmódhoz képest nem kellett bővüljenek.

A szűrő mérés esetében is a minimális jel/zaj viszony érdekében a mérés csak a monokromátor hullámhosszát állító léptetőmotornak mindenkori álló helyzetében történhet a 100 jelperiódus integrálása, illetve annak mátrixba eltárolása végett. A mérési parancs szerint majd csak ezután léphet tovább a motor lép-mér üzemmódban a következő hullámhosszra.

A vezérelt mérési ciklusok befejezése után a feldolgozó algoritmus összeveti a mért értékből adódó mátrixot a referencia értékekkel és ezután rajzolja ki a vizsgált minta 4.5. ábrán látható spektrális görbéjét, amiből a napelem pillanatnyi munkafázisa értékelhető.



4.5. ábra. CIS napelem gyártás ZnO vastagság beállítási fázisai

A ZnO vastagság beállításon túl jelentős fejlesztési eredménynek számít a CI(G)S napelemen történt módosítás (Rakovics, Réti, 2013). A korábbi CdS réteget a 4.6. ábrán látható formában egy nagyobb hatékonyságú CdS:Cu vékonyréteg váltja fel a módosított napelem esetén.



4.6 ábra. CI(G)S módosított napelem szerkezete

A zárt ciklusú fejlesztési módszernek köszönhetően a ZnO előoldali kontaktus után az új CdS:Cu ablakréteg változatok optimalisabb tulajdonságait is kimutathattam. A CdS:Cu kísérleti rétegeivel önálló 76 mm x 25 mm x 1mm üvegszűrő minták készültek kémiai fürdőben lerakódásos eljárással (4.7. ábra), amik folyamatos kontroll alatt voltak.



4.7. ábra. CdS:Cu kísérleti rétegek kialakítása

Ennek köszönhetően születhetett meg az a további technológiai eredmény is, hogy a Cu adalékolt CdS filmek 200 °C-on történő hőkezelése által a rétegeknek magasabb lett a fényvezető és kisebb sötét vezetőképessége. Ennek birtokában, a dopping szintek vizsgálata már csak hőkezelt mintákon történt (4.8. ábra).



4.8 ábra. CdS:Cu rétegek dopping szinttől függő spektrális tulajdonságai

Az ábrán jól nyomon követhetőek az optimalizációs lépések. A kiértékelő mérés szerint a spektrum csúcsok hosszabb hullámhossz irányába mozdultak el attól függően, hogy a Cu^{2+} doppoló anyag koncentrációja a fürdőben 1, és $5x10^{-5}$ M/l között mekkora értékű volt.

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.

A kidolgozott optikai minősítő módszer sokoldalúságára és pontosságára jellemző, hogy megbízható alapot teremtett egy olyan eljárás kidolgozásához is, amely segítségével, valamint speciális optimalizáló programom felhasználásával színes üvegrétegek összeragasztásával szinte bármilyen átviteli görbét leutánzó üvegszűrő kombináció hozható létre: pl. az emberi szem érzékenységét leutánzó V(λ) szűrő, aminek segítségével a napelemek teljesítmény romlását is kitűnően nyomon lehet követni, vagy a tristimulusos színmérő X,Y,Z szűrőkombinációi, vagy akár speciális infra LED-ek előtétszűrői.

Az eljárás programja a fényérzékelő és az elé virtuálisan elhelyezett, kalkulált vastagságú színes üvegszűrő együttest optimalizálja úgy, hogy a detektor-szűrő kombináció a 4.4. ábrán látható mérési összeállítás alapján mérhető eredő spektrális érzékenységi görbéje egy kiválasztott célgörbét a megadott hibáig közelítsen. A 4.1. táblázat tartalmazza a kiválasztható célgörbéket, valamint hibafüggvény típusokat, amelyek közül egyhez a program optimalizálja a szűrő összeállítást.

4.1.	táblázat. Az	z optimalizáló	program	lehetséges	célfüggve	énvei és	hibafügg	vénvei
			p. 0 0				1110 111000	,

Megnevezés	Jelentése
$V(\lambda), X, Y, Z$	Célfüggvények
Integral error	Integrálási hiba
F1'	V(λ) illesztés f ₁ ' hibája %-ban megadva

Az optimalizáló program részére a célfüggvények adatállományán túl szükséges volt még a 4.2 táblázatban felsorolt Si, Ge és GaAs alapanyagú detektor, továbbá néhány SCHOTT német üveggyár által gyártott optikai színszűrő típus (UG, BG, FG...) transzmissziós adatainak, valamint a detektorok minőség ellenőrzésénél megkívánt megvilágító lámpák (Normal A, D65) spektrális sugárzási értékeinek betáplálása is.

4.2. táblázat. Az optimalizáló program adatállománya

Detektorok	Si, Ge, GaAs
Optikai szűrők	UG, BG, FG, GG, KG, NG, OG, RG, VG,WG
Összehasonlító fényforrások	Normal A, D65

Az optimalizáláshoz a hatékonyabb működés érdekében ajánlott a betáplált szűrőhalmazból kiválasztani azt a négy-öt típust, amivel várhatóan a program gyorsan célba ér. A program futásakor a kiinduló vastagsági értéknek a betáplált µm értéket veszi, amit a célfüggvényhez közelítésnek megfelelően több lépésben változtat. A lépések közben a kurzorral kiválasztott szűrő vastagsága rögzíthető, vagy felszabadítható, mivel a program a szűrők vastagságának változásai felől közelítőleg két másodpercenkénti kijelzésekor beavatkozási lehetőséget nyújt.

Az optimalizálás ideje függ az illesztési hullámhossz határoktól, a virtuálisan használt szűrő fajták számától, valamint a szűrővastagság-változtatás egységnyi lépésének nagyságától, amelyek mindegyike az optimalizálás kezdete előtt beállítható.

Ha az algoritmus elér az illesztési hiba valamilyen lokális minimumához, akkor hangjelzéssel leáll és megjeleníti a képernyőn a végeredményt (4.9. ábra).



 4.9. ábra. CIE V(λ) illesztési görbe és a hiba középső vonalon történő megjelenítésével

A diagram vízszintes tengelye a hullámhosszt tünteti fel nm-ben, a baloldali függőleges tengelyen a relatív érzékenység szerepel, a jobboldali függőleges tengelyen pedig a célfüggvénytől való eltérés %-ban kifejezve, ami ebben az esetben igen jónak számító 1,39 %. A három görbe közül a szaggatott vonallal rajzolt a célfüggvény, a folyamatos vonallal rajzolt a detektor-szűrő kombináció spektrális érzékenységi görbéje, a pontvonallal rajzolt pedig a hibafüggvény.

A bevezetett új módszeremmel így két olyan hatékony eszközt tudtam biztosítani a napelem gyártás számára, amelyek nemzetközileg hitelesített alapelemekre vezethetők vissza. Amíg az egyikkel még a napelem gyártás részeredményének számító homlokoldali transzmisszió optimalizálható, addig a másik V(λ) szűrőzött detektorral pedig a végtermék elvárt fényhasznosítása elemezhető nagy biztonsággal.

4.2. 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.

Az infravörös tartományban szerzett tapasztalatok alapján az InP hordozóhoz rácsilleszthető InGaAsP kvaternerre esett a választás. Ez esetben az anyag tiltott sávszélessége 0,75-1,35 eV tartományban változtatható, ami 1000-1700 nm spektrumtartományt jelent. Az InGaAsP félvezetőben a gerjesztett töltéshordozók rekombinációjával keletkező elektromágneses sugárzás hullámhossza fordítottan arányos az anyagra jellemző tiltott sáv energiájával.

Így az aktív InGaAsP réteg összetételének változtatásával lett beállítva a diódákból kilépő sugárzás kívánt hullámhossza.

Nagyon fontos volt még, hogy hol helyezkedjen el a p-n átmenet a szerkezetben (4.10. ábra).

-- ha nagyon a felületen van, akkor a felületi rekombináció miatt lesz veszteség

-- ha meg nagyon mélyen, akkor a fény jó része elvész.



^{4.10.} ábra. InGaAsP/InP félvezető LED felépítése

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. Mivel az aktív réteg kisebb tiltott sávval és nagyobb törésmutatóval rendelkezik, mint a határoló rétegek és ezek atomi közelségbe kerültek egymáshoz, ezért kettős heteroszerkezet jött létre, ami az átmenetre merőlegesen összetartja az injektált töltéshordozókat és a keletkező fotonokat.

Döntő jelentőségű, hogy az InP törésmutatója kisebb a GaInAsP-nál. Ezáltal a keletkező fény az aktív rétegben koncentrálódott. Így tehát az InP nagyobb sávszerkezetével az elektronokat, kisebb törésmutatójával pedig a fényt koncentrálja az aktív rétegbe.

Az n-InP oldalon kilépő fénysugár széttartása az átmenetre merőlegesen az aktív réteg vastagságától függött (4.11. ábra).



4.11. ábra. Egy optimalizált IR dióda chip közeltéri képe működés közben
Annak érdekében, hogy hatékony diódákat kapjunk, a határoló rétegeknek átláthatónak kellett lennie az aktív réteg által kibocsátott sugárzás részére.

Nagyon lényeges volt a kontaktus rétegek kialakítása. Ahhoz, hogy a 290x290 μ m nagyságúra feldarabolt szeleteket végül jól ki tudjam szerelni, előtte olyan kontaktus réteggel kellett ellátni, amikhez maradandóan hozzákötődik a vezetőképes epoxi, illetve a kikötő Al huzal. A szelet *p* oldalán Au-Zn / Cr / Au, viszont az *n* oldalán, ahol a fény kijön és emiatt a legkevésbé akadályozó 50 μ m vastag Al huzallal kötöttem ki egy TO 18 tokra, Au-Sn / Au vezető réteg bizonyult a legjobbnak. A 4.12. ábrán látható kikötéseket MECH-EL 907 bondolóval végeztem.



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

A bondoló nagyfrekvenciás jellel rezgeti azt a nyomótűjét, amivel az Al huzalt a szelethez nyomja és az a súrlódási hőtől a szelethez heged. Ezáltal éri a legkisebb hőterhelés a szeletet, amire egy félvezető nagyon érzékeny. A 4.12. ábra jobb oldala már egy olyan LED-et mutat, amelyet kiszerelés után átlátszó epoxi réteggel vontam be. Az epoxi kettős feladatot tölt be. Egyrészt stabilizálja az elektromos kikötést, másrész elősegíti a LED-ből kijövő fény jobb optikai leképzését.



4.13. ábra. LED minta mérések blokkvázlata

A 4.13. ábra azt az összeállítást mutatja, amellyel az elkészült LED-ek emissziós spektrumát ellenőriztem. A mérendő LED fénye a kettős monokromátorrá átalakított Cary 17 spektroradiométer belépő résére van leképezve. A monokromátorból kijövő fényt egy Mérésügyi Hivatalban hitelesített detektorral mértem, illetve egy személyi számítógéppel dolgoztam fel.

Néhány LED minta elkészülése után kiderült, hogy nem volt elegendő felosztani néhány egyenlő részre a kívánt sugárzási tartományt (4.3. táblázat).

4.3. táblázat. 9 LED aktív rétegének optikai tulajdonságai és teljesítménye 100 mA meghajtó áram mellett 24 °C hőmérsékleten

λ_{S} (nm)	<u>λ_P (nm)</u>	$\lambda_l(nm)$	$\Delta\lambda_{\rm B}~({\rm nm})$	optikai teljesítmény (mW)
1085	1124	1155	70	2,9
1120	1157	1185	65	2,0
1174	1215	1246	72	1,9
1230	1273	1301	71	2,1
1288	1339	1372	84	1,9
1337	1386	1418	81	1,7
1423	1485	1526	103	1,5
1506	1577	1616	110	1,4
1589	1674	1717	128	1,4

A 4.3. táblázat igazolja, hogy a kisugázási hullámhossz növelésével a spektrum félérték szélessége nem lineárisan, hanem a hullámhossz négyzetével arányosan növekszik.

Az egyes LED spektrumok fél intenzitási pontjainál λ_s jelenti a rövid, λ_l a hosszú hullámhosszat, (λ_P) a maximumot, $\Delta\lambda_B$ pedig a spektrális sávszélességeket. Az elkészült 9 féle LED-et 40 ⁰C-ra hőstabilizáltan mértem, mert a LED spektrumát jelentősen befolvásolja a hőmérséklete (4.14. ábra).



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

A diódasorom jól példázza, hogy a félvezető heteroszerkezetek összetételének finom hangolásával elérhető, hogy optimális legyen a távolság az emissziós hullámhosszak csúcsai között és így elegendő átfedése legyen a kisugárzott spektrumoknak (lásd a 69. oldalnál írottakat).

Mind a 9 dióda tipusnál a szelet hőmérsékletének növekedésével a kisugárzás hullámhossza is felfelé tolódott. A hőmérsékletfüggést egy a sorozatból kiragadott példával a 4.15. ábrán szemléltetem.



4.15. ábra. LED fénykibocsátásának hőmérséklet függése

A 4.15. ábrán bemutatott eredmények igazolják annak a fontosságát, hogy miért szükséges a világító félvezetők termosztálása. Egy 1215 nm csúcshullámhosszon sugárzó InGaAsP/InP dióda spektruma jelentősen elmozdul a hosszabb hullámhossz irányába a hőmérséklet növekedésével 30 °C és 170 °C között.

A világító szeleteket hőfokfüggése egyúttal lehetőséget is kínál a kisugárzás hullámhosszának kívánság szerinti finom hangolására. Ugyanakkor felhívja a figyelmet arra is, hogy milyen fontos a behangolt LED-ek hőstabilizálása is. Ezért

döntöttem a fémtokozás mellett, mert hővezetésük által ez a hangolás 1 %-on belül kézben tartható.

A LED-sor végső összeszerelése előtt kísérletet tettem optikai úton történő hatásfok növelésre (4.16. ábra).



4.16. ábra. Terelőtükör-műgyanta kombinációk hatása a kivehető teljesítményre

Az új eszközből kinyerhető fény maximalizálása érdekében elkészítettem a 4.16. ábrán látható terelőtükör-műgyanta kombinációs kísérletet.

Az összehasonlításokhoz a gyorsasága miatt elterjedt 4.17 ábrán látható kis átmérőjű (50 mm) integráló gömbös mérési összeállítást használtam (Martin, Réti et al., 1990).



4.17. ábra. Terelőtükör-műgyanta kombinációk összehasonlító mérése

A kísérlet sorozatot egy 1124 nm hullámhosszon sugárzó félvezetővel, mint minta LED-del végeztem. 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 szereljem ki a LED sort egy jobb fény nyereség érdekében.

A 4.18. ábra mutatja azt a LED-sort, amit a tézisben leírt kísérletek, mérések és azok eredményei alapján sikeresen megvalósítottam. Az ábra az új eszköznek azt az igényes alkalmazását is előrevetíti, hogy mint LED ARRAY egy nagy pontosságú 1000-1700 nm szélességű tartományban működő spektrométerben kiváltson egy 100 W-os fogyasztót.



4.18. ábra. Spektrométerbe építhető LED sor

A képen összegezve láthatók azok a tézisben felsorolt elemek, amelyek alkalmazásával elkészítettem más félvezető heteroszerkezetek összetételének finom hangolásával és megfelelő kiszerelésével kialakítható széles spektumot átfogó, nagy stabilitású és nagy hatásfokú energiaátalakító eszközt.

- a világító diódákat közösen hűthető arannyal bevont fényterelő fészkekbe építettem be a hullámhossz csúcsaiknak megfelelő periódusban,
- az elektromos kikötéseket lerögzítő, valamint a diódaszeletekből kijövő fény jobb optikai leképzését elősegítő epoxival vontam be a szeletet.

Ezen eredmény (*Rakovics, Réti et al., 2002*) bíztató visszhangjára jellemző az eszköz nemzetközi térhódítása is (Instrumentation Metrics-USA, BTT-Finnország).

4.3. 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. Azaz egy az új célnak megfelelően módosított 1650 nm hullámhosszon sugárzó négykomponensű GaInAsP heteroszerkezetű félvezetőt alkalmaztam, ahol a rétegek rácsállandója és a tiltott sáv szélessége egymástól függetlenül változtatható volt az összetevők arányának megváltoztatásával (4.19. ábra).



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

Az InP hordozóra egy vele azonos típusú InP réteg, majd több rétegben InGaAsP aktív négykomponensű réteg és zárásul egy a hordozóval ellentétes típusú InP réteg lett leválasztva. Az aktív réteg kisebb tiltott sávval és nagyobb törésmutatóval rendelkezik, mint a határoló rétegek és ezek atomi közelségbe kerültek egymáshoz, ezért kettős heteroszerkezet jött létre, ami az átmenetre merőlegesen összetartotta a beérkező fotonokat és a keletkező töltéshordozókat.

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).

A hosszú távon megbízható kontaktus rétegek a LED készítésnél bevált recept alapján lettek kialakítva a kísérleti 290x290 µm nagyságú szeleteken. Azaz a szeletet p-oldala felől Au-Zn / Cr / Au rétegre volt szükség ahhoz, hogy vezető epoxival jól hozzáragaszthassam a TO 18 tokhoz. Az n-oldalra viszont csak nagyon kicsi és mégis jól tapadó Au-Sn / Au vezető pöttyöt kellett kialakítani ahhoz, hogy a fény bejutását legkevésbé akadályozva 50 µm vastag Al huzallal kiköthessem (4.20. ábra).



4.20. ábra. Minimális fény kitakarással kiszerelt "LED" detektor

A TO 18 tokra kiszerelt detektorok újdonsága megkívánta, hogy végső ellenőrzését a nagy pontosságú nemzetközi etalonra visszavezethető 4.1. ábrán látható mérési eljárással tegyem meg.

Már az első kísérleti szeletek nagyon bíztató, kis jel/zaj viszonnyal rendelkező, széles spektrumban érzékeny fényátalakító detektorokként működtek (4.21. ábra).



4.21. ábra. 1650 nm hullámhosszra készített PIN és "LED" detektor spektruma

Az eredményem szemléletesebb bemutatása végett összehasonlító mérést végeztem egy 1650 nm hullámhosszra készített PIN és a széles spektrum tartományban érzékeny fényátalakító között. Az egyberajzolt mérési eredményekből két fontos új eredmény olvasható ki.

 a széles spektrumú detektor kapcsolati rétegei, határoló rétegei és aktív rétegek szintjei elegendően átlátszóak voltak abban a hullámhossztartományban, amelyben a soron következő aktív rétegszintek érzékenyek voltak, a széles spektrumú detektor fényenergia átalakításának hatásfoka az adott hullámhossz tartományban közel másfél szerese lett az 1650 nm hullámhosszra készített PIN társához képest.

A "LED" detektornak további feltünő tulajdonsága, hogy érzékenységi tartománya közel azonosnak mutatkozott a hasonló kiszerelésű PbS detektoréval. Viszont jel/zaj viszonyban az új detektor több, mint tízszer jobb eredményt mutatott. Az optikai hatásfok növelésére a "LED" detektor esetében is kimértem a LED-sornál alkalmazott terelőtükör-műgyanta kombinációkat (4.22. ábra).



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

A "LED" detektor elé tett terelőtükör-műgyanta kombinációk hatásának kiméréséhez a gyorsasága és hatékonysága miatt kedvelt 4.23. ábrán látható kis átmérőjű (50 mm) integráló gömbös mérési összeállítást használtam (*Martin, Réti et al., 1990*).



4.23. ábra. Terelőtükör-műgyanta kombinációk összehasonlító mérése

A szűrőzőtt kalibrált detektor szerepét töltötte be a kísérleti "LED" detektorom. A kontroll LED₁ (1215 nm), a kontroll LED₂ (1674 nm) és minta LED (1386 nm) sugárzókat pedig a 4.3. táblázat elemeiből vettem.

További optikai nyereséget értem el párhuzamosan érkező sugárzás esetére, ha a szelet elé gyüjtő lencsét helyeztem, illetve gyüjtőtükör rendszerbe építettem (4.24. ábra).



4.24. ábra. "LED" detektor gyűjtő lencsével és gyűjtőtükör rendszerbe építve

Az új "LED" detektor gondolkodásmóddal jól látható módon a fényátalakítás témakörébe is átültethetőek mindazon eredmények, amelyek segítségével a LED térhódítása napjainkban megvalósul. Ez az új módszer a széles sávú fényenergia átalakításban egy olyan új utat nyitott meg, amellyel az adott tartományon a 4.22. és a 4.24. ábrán bemutatott eredményeket összegezve a 4.23. ábrának mérési összeállításával 80mA LED áramértékek mellett 33.5 %-os energiaátalakítási hatásfokot tudtam kimérni. Az új módszer más anyagok (GaAs) és más technológia (MBE) felhasználásával még szélesebb sávú, jó hatásfokú napelemek előállításához járul hozzá (lásd a 30. oldalnál írottakat).

4.4. Eljárás a napelem pillanatnyi hatásfokának meghatározásához

A 4.1. ábra, valamint a 4.4. ábra által szemléltetett optikai minősítő méréseim, valamint az optimalizáló program alkalmazásával készített eszköz együttes felhasználása eredményezte azt a 4.25. ábrán látható módszert, amely segítségével a felhasználói környezetben, nemzetközi etalonra visszavezethető pontossággal ellenőrizhető bármely típusú napelem, illetve napelem rendszer időbeni degradációja. Ezen módszert használtam sikerrel továbbá annál a feladatnál is, amelynél Budapest közvilágítás hálózatát kellett optimálisabban, energiatakarékosabban működtetni.



4.25. ábra. Napelem modul megvilágításmérővel

A módszer alapeleme egy olyan általam készített nagy pontosságú telepes megvilágításmérő készülék elvének kidolgozása, amely szabad téren, belső terekben és laboratóriumokban egyaránt használható megvilágítás mérésére. (4.26. ábra)



4.26. ábra. MINILUX megvilágításmérő

A készülék 5 önműködően beálló méréshatárral rendelkezik. Fényérzékelője nagyérzékenységű szilícium fényelem, melyet igen pontosan hozzáigazítottam a CIE V(λ) görbéjéhez. A V(λ) illesztés pontossága lehetővé teszi, hogy a készülék korrekciós tényező nélkül használható mind természetes világítási körülmények között, mind pedig a legkülönbözőbb mesterséges fényforrások (műnap) alkalmazása esetén. A nagy pontosságú cosinus korrekció teszi lehetővé, hogy a ferdén beérkező sugár esetén is optimális értéket olvassunk le. A mérőeszköznek az Országos Mérésügyi Hivatalban történő hitelesítése után az amerikai sztenderdre visszavezethető pontossága lett, így leszármaztatott etalonként a fényelem vizsgálatok biztos támpontjaként alkalmaztam. A készülék mérőfejének sematikus rajza a 4.27. ábrán látható.



4.27. ábra. V(λ) korrigált mérőfej cos korrekcióval

Az etalonként szolgáló készülék módszertani előnyét az szolgálja, hogy mérőfejének térbeli érzékenysége a 4.28. ábrán látható teszt görbéje szerint

ugyanúgy a belépő fénysugár cosinusával arányos, mint a fényelemek többségének átalakítási hatásfoka.



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

Az alábbiakban két napelem típus időbeni degradációjának kimérésével bizonyítom be módszerem hatékonyságát. Minden esetben a vizsgálandó napelem szerkezeti síkját meghosszabbítva helyeztem el a Minilux etalont (4.25. ábra) és hasonlítottam össze a pillanatnyilag leadott teljesítményét az angliai műnap szimulátor, az Energy Equipment Testing Service Ltd. cég, PVMT 11250 Modul Tester berendezésének mérési adataival.

Kiindulásként két olyan típusú napelemet vizsgáltam, amelyekre a műnap szimulátor gyártója a készüléket elsődlegesen felkészítette. Az egyik egy Korax KS 77 típusú egykristályos szilícium alapelem volt (4.29. ábra).



4.29. ábra. Korax KS 77 típusú egykristályos szilícium alapelem

A másik vizsgált típus pedig egy Kyocera gyártmányú KC85GX polikristályos napelem volt (4.30. ábra).



4.30. ábra. Kyocera KC85GX típusú polikristályos szilícium alapelem

A 4.31. ábra, valamint a 4.32. ábra mutatja, hogy a két napelem típus műnappal kimért feszültség-teljesítmény és feszültség-áram függése karakterisztikusan eltérnek egymástól.



4.31. ábra. Korax KS 77 egykristályos napelem műnappal kimért karakterisztikái



4.32. ábra. Kyocera 85 GX típusú polikristályos napelem műnappal kimért karakterisztikái

Az alábbi mérési adatokkal bizonyítom be, hogy a karakterisztikus különbségek ellenére módszeremmel biztos értékeket kapunk a vizsgált napelemek időbeni degradációjára. Első lépésként a 4.4. táblázatban összegeztem a két vizsgált napelem műnap adta besugárzási körülmények közt adódó villamos paramétereit, amiket kiegészítettem azokkal párhuzamosan mért megvilágítási értékekkel, amelyeket a Minilux etalonnal mértem.

Megnevezo	Egykristályos napelem (Korax)	Polikristályos napelem (Kyocera)	
I _r	[A]	5,0	5,0
U _ü	[V]	21,5	22,0
Besugárzás (Irradience)	[W/m ²]	1000,55	1000,55
Megvilágítás	[klux]	51,7	51,7
φ (FF)	[-]	0,65	0,79
P _m	[W]	69,9	87,7
U _m	[V]	15,5	17,8
Im	[A]	4,51	4,93
T _{napelem}	[⁰ C]	39	39

4.4. táblázat. Egy- és polikristályos napelemek villamos paraméterei műnap adta besugárzás esetén

Ezen adatokat egészítettem ki azokkal a mérési eredményekkel, amelyeket természetes körülmények között végeztem (4.25. ábra).

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 ⁰C volt.

A kidolgozott módszer segítségével a 4.33. ábrán és 4.34. ábrán immáron számszerűsítve is láthatóvá váltak azok az idő és időjárás előidézte változások, amelyek a napelemek teljesítmény leadását befolyásolták.



4.33. ábra. Korax KS 77 egykristályos napelem teljesítmény változása természetes körülmények között



4.34. ábra. Kyocera 85 GX típusú polikristályos napelem teljesítmény változása természetes körülmények között

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 szintén ismeretlen GaAs alapú napelemet (4.35. ábra).



4.35. ábra. Conrad TPS-102-6 típusú amorf szilícium napelem kontroll mérése természetes körülmények között

Az egykristályos és polikristályos szilícium napelemekkel történt mérési eredmények összehasonlítása érdekében ezen esetben is a napelem leadott teljesítményét akkor regisztráltam, amikor a Minilux etalon 51,7 kiloluxot mutatott és a napelem hőmérséklete 39 ⁰C volt.

A 4.36. ábra a kiválasztott új napelem teljesítményének változásait mutatja az idő és időjárás okozta degradációk tükrében.



4.36. ábra. Conrad TPS-102-6 típusú amorf szilícium napelem kontroll mérése természetes körülmények között

A 4.37. ábra értékei úgy lettek felvéve, hogy mindhárom típusú napelemet egyetlen 45 fokos dőlésszögű síkra szereltem fel egy éves időtartamra, a síkon helyet biztosítva az etalonnak az ellenőrzésre.



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

A kidolgozott módszeremnek leghasznosabb következtetései a 4.37. 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.

4.5. Modell az új félvezető fajta kialakításához

A szakirodalmi áttekintés fejezetben összegyűjtött információk birtokában a legígéretesebbnek a GaAs-alapú napelem struktúrák létrehozása látszik. A GaAs alapú napelemeknek rendkívül jó az abszorpciós képessége. A tilos sávszerkezete eléri az 1,4 eV-ot (*Friedman et al., 2003*). A hatásfokuk 30 % körül van (*Emery et al., 2011*). Ezt a határt összetett, úgynevezett többsávú eszközök használatával át is léphetjük ((*Honsberg et al., 2006, Liang et al., 2012*). A jövőt nézve nagyon nagy előnynek látszik, hogy a tilos sáv szélességét tág határok között lehet változtatni, a rétegek összetételének előre jól kiszámítható változtatásával (*Jasik et al., 2002, Holec, 2006*). A GaAs-alapú napelem struktúrák létrehozásának fontos feltétele viszont a félvezető-kristályrétegek és nanoszerkezetek kontrollált növesztése. Ezek a néhány atomsor vastag rétegek, illetve más nanoméretű objektumok elsősorban molekulasugár-epitaxiával növeszthetők (*Nemcsics, 2011*). Ennél az eljárásnál a rétegnövesztés, a nagy szabadúthossz és a réteg tisztasága miatt csak olyan térben történhet, ahol a rétegek növesztésének megkezdése előtt biztosítani tudjuk az ultra nagy vákuumot (ultra-high-vacuum, UHV, 10⁻¹¹ mbar).

Az új félvezető kialakításához használatos modell alapkövei ezáltal a következők:

- 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.

A feladat kidolgozásánál peremfeltételként vettem figyelembe azokat az infrastruktúrális alapelemeket, amelyek többnyire Németországból származó vákuumtechnikai eszközök voltak. Segítségükkel a felépítendő MBE modellképét a következőképpen alakítottam (4.38. ábra).



4.38. ábra. Az MBE berendezés modellképe

A modell középpontjában a főkamra (reaktorkamra) áll, ahol minden rétegnövesztéssel kapcsolatos művelet zajlik. Nagyságát kellően nagyra kellett méretezni ahhoz, hogy ne csak a növesztési folyamat, hanem annak megfigyelése is akadálytalanul működjön. A nagyságnak viszont korlátot szab az a körülmény,

hogy ebben a térben kell biztosítani a legjobb vákuumot. (10⁻¹¹ mbar). A méret optimalizálásánál fontos szerepet töltött még be a rendelkezésre álló vákuumtechnikai eszközök választéka, ami végső soron egy 20 dm³ űrmértékű kettős falú hengeres edényhez vezetett (4.39. ábra).



4.39. ábra. A modellhez igazodó MBE főkamra

A főkamra kettős fallal és a palástján több, a fő feladatra fókuszáló nyílással lett megtervezve, hogy a későbbiekben benne készülő minta lehetőleg minél több oldalról megközelíthető legyen. A dupla fal az ultra nagy vákuum javításában játszik szerepet azáltal, hogy folyékony nitrogént vezetve a két fal közé a lehűtött fal elősegíti a maradék szennyező anyagok kicsapódását. Ez a jelenség vákuumértékekben egy előkísérletem során úgy mutatkozott meg, hogy miután hűtetlen falú állapotban a segédkamra turbószivattyújának segítségével 8 x 10⁻⁸ mbar nyomásértéket elért a rendszer, folyékony nitrogént vezettem a két fal közé. Hatására a mért nyomás fokozatosan 1,2 x 10⁻⁹ mbar értékre változott annak ütemében, ahogy a hideg falfelületen a szivattyúzás ellenére a térben maradt szennyező anyagok kicsapódtak. Az előkísérlet tapasztalatai felhívták a figyelmet arra, hogy a hűtött felületet úgy célszerű kialakítani, hogy az időről-időre megtisztítható legyen a lerakódott szennyező anyagoktól.

A rétegnövesztés legkritikusabb eseménye a részecskesugarak mintára szabályozott módon történő kibocsátása. Erre a műveletre leginkább egy speciálisan ezt a célt szolgáló effúziós (más néven Knudsen) cellát szokás használni (4.40. ábra). A rendszerbe a lehetőségek miatt négy ilyen cella lett betervezve (Ga, As, In, Al) hagyományos vertikális irányítottsággal. A növesztéshez szükséges molekulasugarak, e cellák megfűtésével hozhatók létre.



4.40. ábra. A modell alapján beépített Knudsen cellák

A kidolgozáskor a molekula sugarak irányítottságára is gondolni kellett. Ebben az esetben is a falhűtéses alapötlet látszott a leginkább kivitelezhetőnek. Jelen esetben a fal egy duplafalú cső, amiben hűtővíz keringethető és ágyúcső módjára a minta irányába néz. Azáltal, hogy a ferdén kiröppenő molekulák a vízhűtéses fallal találkoznak és kicsapódnak azon, így csupán azok a molekulák tudnak tovább repülni, amelyek a hűtött cső által megszabott kis kúpszögön belül a minta felé mozognak.

A főkamra kitalált modellképének fontos része egy nagyfeszültségű súrolószögű elektron diffrakció (Reflection High-Energy Electron Diffraction - RHEED), amellyel egy közel 30 keV energiájú elektronnyaláb lenne fókuszálva az új napelem minta felületére kisebb, mint 4° beesési szöggel. A molekula növekedés in-situ módon vizsgálható, valamint az is, hogy milyen nanostruktúrák képződnek a mintán (kvantum dot, kvantum ring, kvantum double ring, kvantum well, illetve nano hole). Mindehhez az elektron ágyúval ellentétes oldalon egy foszforral bevont fluoreszcens képernyő is tartozik a nanostruktúrák RHEED mintázatának megjelenítésére (4.41. ábra).



4.41. ábra. A molekula növekedés in-situ módon történő vizsgálatának modellképe

A RHEED növesztési mintázat azért jeleníthető meg ilyen karakteresen, mert a forrásból kirepülő atomok, illetve molekulák úgy kondenzálódnak a mintán, hogy becsapódásuk következtében kinetikus energiájukat elveszítve már csak a felületen mozdulnak el és atomról-atomra, illetve molekuláról-molekulára jól detektálható módon kémiai kötésbe lépnek a felülettel. A szabályos rétegépülés során a képernyőn detektált jel erőssége oszcillál, amelynek egy periódusa egy monorétegnek felel meg. 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 (4.42. ábra).



4.42. ábra. Speciális precíziós három irányba mozgatható és el is forgatható manipulátor elhelyezési terve

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 (4.43. ábra).



4.43. ábra. Mozgatható mintatartó fogadó egység

A sokrétű felhasználás érdekében a mozgatható mintatartó fogadó egységében helyet kellett kapjon egy fűtőegység is, ami a hatékonyabb rétegképződést segítheti

elő. Ez az egység opcionálisan egyes speciális, alacsony hőmérsékletű növesztések esetén kikapcsolható.

Az, hogy az adalékanyagok párologtatására a klasszikus vertikális irányítottság lett kiválasztva, egyben magában hordoz néhány mintakezeléssel kapcsolatos megoldandó problémát. Megoldást kellett találnom arra, hogy a kevésbé légritkított térből (zsilip kamrából) minél hatékonyabban lehessen elhelyezni a mintát a kívánt helyzetekbe. Az egyenes vonalú mozgatásra és tengely körüli forgatásra a modellben a vákuumbiztos mágneses rudazatot választottam, viszont annak a hosszánál fogva jelentős a kilengése is annál a végpontjánál, ahova a mintatartót rögzíteni kívántam. A célba találáshoz egy olyan 4.44. ábrán látható molibdén alapanyagú papucsot kellett kitalálni, amely a három oldali ékes kialakítása révén megkönnyíti a végső irányba állást az ellentett formájú idomban.



4.44. ábra. Mintatartó mozgatható és fogadó egység

Az MBE technológiai rendszerében technikai újdonságként alkalmaztam egy spirálrugóval előfeszített csúszóvilla bajonett-foglalathoz hasonlóan kapcsolatát a 4.45. 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. A mintaszeletnek elterjedt rögzítése a szelet kontrollált hőmérsékleten tartása érdekében indiummal történik, ami a diákokkal együtt történt előkísérletek során kevésnek bizonyult. Ezért az indium laboratóriumokban bevált alkalmazása mellett az MBE technológiában újdonságként a 4.45. ábrán látható rugós megfogást dolgoztam ki és alkalmaztam. Ezáltal nagyobb biztonsággal végezhetők a kísérletek.



4.45. ábra. A mintatartó mozgatható és fogadó egysége

Az új konstrukció által egyedi módon egyesítve lett a minta laboratóriumi precíz rögzítési megoldása és a nagyobb darabszámokat előállító ipari stabilitás.

4.6. Molekulaáramot szabályozó algoritmus

A molekulasugár epitaxiával történő új félvezető építésnek egyik nagyon fontos és kritikus kérdése, hogy miként sikerül a molekulák beépülésének folyamat közbeni mérését és vele párhuzamosan а molekulaáram szabálvzását (in-situ) összehangolni. Manuális szabályzások végeredményében jelentős a szerepe az emberi tényezőnek. 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, ami szabályos esetben egy oszcillációs periódusnak felel meg, a RHEED fluoreszcens képernyőjén egy képfeldolgozót kiszolgáló kamera figyeli. A képfeldolgozó egy megjelenő oszcilláció periódus jelének megadott fázisában vezérlő jelet küld a központi egységnek, hogy annak parancsára 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 4.46. ábrán látható, számítógépes felületről történik Programozható Logikai Vezérlő (PLC) felhasználásával.

4. Eredmények

SIMATIC WinCC flexib	le Runtime			
Ga	Knudsen Cell In	Temperature in °C	As	
155 ℃	8 °⊂	8 °⊂	8 °⊂	
1000°C G	870°C G	~1200℃ G	600°C G	Ga blende control
38℃ (L) S	130°C L S	630°C L	Sublimation	Open Close
ON	OFF Crank	OFF	OFF	
Blende	Blende	Blende	Blende	ОК
Start/Stop	Start/Stop	Start/Stop	Start/Stop	Back to Start Screen
EN DE HU				
₫ ◀		Ga Trend Ir	Trend Al Trend	As Trend

4.46. ábra. Knudsen cella vezérlés számítógépes felülete

A PLC használatát négy fontos kommunikációs vonallal valósítottam meg:

- az MBE vezérlő központi PC irányába, amelyen a 4.46. ábrán látható kezelő felület is megtalálható ,
- a RHEED képet önállóan feldolgozó PC irányába,
- a Knudsen cellák hőmérsékletét mérő és vezérlő alegység irányába,
- a Knudsen cellák blendéinek mozgató motorjának helyét figyelő és irányító alegység irányába.

A PLC vezérli a párologtatási folyamatot az algoritmusnak megfelelően (4.47. ábra).



4.47. ábra. A molekulaáram szabályzási rendszerének részei

A kommunikáció a számítógépek és a PLC között aszinkron soros vonalon, ASCII karakteres parancsokkal történik. A folyamatirányító PC-n megjelenítésre kerülnek a Knudsen cellákhoz kapcsolódó mérési eredmények, a molekula források pillanatnyi hőmérséklete az aktuális halmazállapottal és nyitottsági helyzettel, valamint a folyamatokba való beavatkozási lehetőségekkel. A RHEED PC önálló feladata, hogy a kamerával kiegészített képfeldolgozó program segítségével a folyamatot ellenőrizze.

PLC feladat még, hogy lehetőséget adjon a RHEED egységnek a folyamatba való beavatkozásra (a párologtatás befejezése).

A PLC az MBE alegységekkel jellegében másként működik együtt. Ebben az esetben már közvetlen ad beolvasási parancsot a molekula források hőmérsékletének mérését és nyitottsági helyzetének meghatározását végző blokkoknak, majd összeveti a PC vezérlő felületén megjelenttel és szükség esetén korrigálási parancsot küld a végrehajtó egységeknek.

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 RHEED PC azonnali figyelő állását azért tartottam fontos menetrendnek, hogy a megfűtött molekulaforrásból bármilyen úton véletlenül kikerülő szivárgó részecskéket a minta felületén azonnal észlelni lehessen. Ezt szintén egy olyan automatikusan működő biztonsági lépésnek szántam, amely a minta szelet megóvása érdekében történik.

A kidolgozott molekulanövesztési eljárás folyamatábráját a 4.48. ábra mutatja.



4.48. ábra. A molekulanövesztés folyamatábrája

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

A 4.47. ábrán megfigyelhető, hogy a PLC a RHEED algoritmust különálló szigetként kezeli, hogy fejlesztése elkülönülve történhessen. A 4.49. ábra már egy olyan tesztelési állapotot mutat, hogy az algoritmussal már ki lehet választani az oszcilloszkóp ernyőn megjelenő pontok közül egyet és annak mozgását követni, intenzitását mérni és azt kiértékelni.



4.49. ábra. RHEED program teszt

A PLC ezzel a RHEED algoritmust futtató személyi számítógéppel önálló kommunikációs vonalon tart kapcsolatot, így a blokkdiagramban is a PLC-nek csak egy önálló leágazásaként szerepel.

Amennyiben a molekulaépítés ezen eljárás szerint történik, akkor 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. A növesztésben éppen ez a kulcsfolyamat, hogy csak ennek követése esetén tud a hordozó GaAs kristályszerkezete folytatódni a leválasztott rétegben annak ellenére, hogy annak eredetileg más kristályszerkezetben kéne növekednie. Ebből az epitaxiális filmrétegből több réteget párologtatva egymásra az új eljárás segítségével, kialakulhat az a szuperrács szerkezet, amely alapköve a nagy hatásfokú napelem struktúrának (*Jasik et al., 2002, Holec, 2006*).

Az új algoritmusnak azért van nagyon fontos szerepe a folyamatban, mert segítségével szisztematikusan ki lehet kísérletezni a párologtatás optimális sebességét, illetve a hozzá tartozó hőmérsékletet, ami nélkül az atomok képtelenek megtalálni az energiaminimumnak megfelelő pozíciójukat és amorf réteget képeznek.

A molekulasugár epitaxiás eljáráshoz köthető téziseim próbájaként három kísérlet készült GaAs/InGaAs félvezető szerkezettel (*Nemcsics et al., 1996*) nyomán. Azért választottam indiumot az aktív réteghez (InGaAs) és nem aluminiumot, mert az a jelenleg elért vákuum érték (10^{-8} mbar) ellenére sem okoz oxidációs problémákat és folytonos réteget tudok képezni vele. Az első fontos lépés az 1x1 cm GaAs hordozóra egy tiszta 0,5 µm vastag GaAs réteg párologtatása volt. Majd csak ez után következhetett a RHEED kép segítségével a kontrollált InGaAs növesztés a 4.48. folyamatábrám szerint. Három különböző vastag aktív réteg kialakításával gondoltam tesztelni a rendszert: 0,8 µm, 1 µm és 1,2 µm esetén. Ahhoz, hogy a p-n struktúra kialakulhasson és a heteroszerkezet fényelemként is tudjon működni, ezért Zn beötvözésre volt még szükség. Ettől a fázistól fogva visszatérhettem a 4.2. tézis LED gyártási technológiájában bevált ötvöző kályhájához, majd az elektromos kontaktus megoldásaihoz (Au-Zn / Cr / Au). Az így kialakított három minta spektrális érzékenysége a 4.50. ábrán látható.



4.50. ábra. Detektorok viselkedése különböző vastag InGaAs réteg esetén

Az ábrán bemutatott eredmények bizonyítják a három féle indium mennyiség befolyását a spektrális érzékenységi görbére. Az aktív InGaAs réteg vastagságának növekedésével az indium miatt a spektrális érzékenység a hosszabb hullámhossz felé tolódott el. Ugyanakkor a növekvő GaAs mennyiség jelenlétét 400 nm és 900 nm között az enyhe parabolikus ív jelzi.

Az elvégzett vizsgálatok igazolták, hogy jobb vákuum viszonyokat elérve az MBE főkamrájában, az LPE technológiával készült széles sávú LED és detektor kutatásait és eredményeit felhasználva, az új komplex molekula epitaxiás eljárással 50%-nál nagyobb energiaátalakítási hatásfok (*Leite et al., 2013*) érhető el. Az MBE technikával ugyanis az eszközparaméterek is kézben tarthatóbbá válnak, hiszen az alacsonyabb növekedési sebesség és az in-situ RHEED kontrol okán a rétegvastagságok és az összetételek gyakorlatiag nem szórnak. Míg az LPE technika esetén ez nem állítható. Ott válogatásra van szükség.

4.7. 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 rendelkező, teljesítményű fénykibocsátó diódák nagy 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

NAGY HATÁSFOKÚ FÉLVEZETŐ ALAPÚ NAPELEMEK

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. SUMMARY

HIGH-EFFICIENCY-SEMICONDUCTOR-BASED SOLAR CELLS

The biggest problem of our new millenium is the rising pollution due to maintain continued economic growth. This could slow down significally over the more efficient, accessable to all, decentralized renewable energy exploitation, where – for example – the sun is a continuous power transmitter. This is a means of increasing the efficiency of the widely utilizable semiconductor-based solar cells.

The main result is that I was able to demonstrate in laboratory with broadband energy converters of solid states, that the light emission and the luminous efficacy problems of the semiconductors are fundamentally the same. Utilizing the interoperability between two realisation processes, with test phases and part solutions received from the other, I was able to shape and improve the light emission and light utilization efficiency of hetero structures made by Liquid Phase Epitaxy(LPE) method. In summary, I created a highly efficient and widely used broadband energy transducer.

My other result is to develop an optical, system type model, which is necessary for evolving new types of semiconductors. This is made using a molecular beam epitaxial (MBE) equipment that can be controlled also in the preparation phase of the nanostructures. This is the most sophisticated and effective technique for the preparation of the zero-, one- and two-dimensional nanostructures.

At my system type model the formation of nanostructures can be kept under continuous (in situ) observation (RHEED control), which provides a way for particles to regulate the rate of transpiration.

My system integrated in situ control paved the way for the self-assembly mechanism for continuous monitoring of structures.

In this way we can always ensure the proper time and temperature for the emergence of the interaction between the particles, that is the formation of the ordered nanostructures by the preparation of the new solar cell.

My model is now able to plan ahead as the thickness of multiple quantum valleys, even the density of quantum dots, which is essencial for the production highefficiency semiconductor solar cells, as well as different wavelength emitting, different hetero-structure, high-power light-emitting diodes.

I developed a new optical rating method, that helped to perform spectral optimizing certain/some phase products of the solar cell production as well as the evaluation of spectral sensitivity finished products, which is traceable to internationally certified standards.

Not only a new type of solar cell can be achieved in the future by the new methods and approaches, but also a variety of special lighting semiconductor devices.

MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

- 1. Advanced Solargy Inc.: Polycrystalline Silicon Products <u>http://judy401.en.ec21.com/6N 99.9999 Purity Polycrystalline Silicon--</u> <u>1472002_1574477.html</u> - Letöltve: 2014.03.17.
- 2. ARKHIPOV V., POORTMANS J. (2006): Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications, West Sussex, John Wiley and Sons, 2006.
- 3. BAJI ZS. (2013): Vegyület félvezető rétegek optoelektronikus és fotovoltaikus célokra, Budapest: PhD értekezés.
- 4. BARNHAM K.W.J., DUGGAN G. (1990): A new approach to high-efficiency multi- band-gap solar cells, *Journal* of *Applied Physics*, 1990/7. Vol. 67, pp. 3490-3493.
- 5. BATHÓ V. (2010): A napelemek környezeti célú vizsgálata (különös tekintettel az energiatermelő zsindelyekre Budapest: Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Atomfizikai Tanszék.
- 6. BÁTHORI G. (2012): Molekulasugár-epitaxiás berendezés (MBE) hőmérsékletszabályozása Siemens S7-300-as PLC-vel, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar: Műszertechnikai és Automatizálási Intézet, 2012.
- BERKÓ T., RÉTI I., SZENTPÁLII B., NEMCSICS Á., PÜSPÖKI S., NÉMETH Á., LÁBADI Z., TURMEZEI P., (2009): Napelemmodulok napszimulátoros minősítésének méréstechnikai problémái, *Elektronikai Technológia, Mikrotechnika*, 2009. 36-37. o.
- 8. BOHÁTKA S. (2008): Vákuumfizika és Technika, Budapest: Eötvös Lóránd Fizika Társulat.
- 9. BRADLEY D. (1991): Characterisation of polymers for semiconductor applications, *Polymer International*, 1991. Vol. 26. pp. 3–16.
- BRÜMMER O., HEYDENREICH J., KREBS K.H., SCHNEIDER H.G. (1984): Szilárd testek vizsgálata elektronokkal, ionokkal és röntgensugárzással, Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- 11. CHEN Y.C., BHATTACHARYA P.K. (1993): Determination of critical layer thickness and strain tensor in In_xGa_{1-x}As/GaAs quantum-well structures by x-ray diffraction, *Applied Physics Letters*, 1993/73-11. pp. 7389-7394.
- 12. DINGLE R., GOSSARD A.C., WIEGMAN W. (1975): Physical Review Letters, 1975/34. pp. 1327-1330.
- 13. ESAKI L., CHANG L.L. (1974): Physical Review Letters, 1974/33. pp. 495-498.
- 14. FARA S., STERIAN P., FARA F., IANCU M. (2010): Influence of the optical parameters of the quantum well solar cells upon conversion efficiency, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2010/12. pp. 129-134.
- 15. FARKAS I. (2003): Napenergia a mezőgazdaságban, Mezőgazda Kiadó.
- 16. GREEN M. (1986): Solar Cells, University of New South Wales
- 17. GREEN M. (2005): Thin-Film Solar Cells, *Review of Technologies and Commercial Status,* University of New South Wales

- 18. GREEN M., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W. (2011): Solar cell efficiency tables (version 37), *Research and Applications*, 2011/19. pp. 84-92.
- 19. HAYASHI I., PANISH M.B., FOY P.W. (1969): Introduction Semiconductor, *Quantum Electronics*, 1969. Vol. 5, pp. 210-212.
- 20. HERMAN M.A., SITTER H. (1989): Molecular beam epitaxy, Berlin: Fundamentals and current status, Springer-Verlag.
- 21. HOLEC D. (2006): Critical Thickness Calculations for In_xGa_{1-x}N/GaN Systems, Selwyn College.
- 22. HOLONYAK N., KOLBAS R.M., LAIDIG W.D., DUPOIS R.D., DAPKUS P.D. (1978): Soviet Technical Physical Letters 1978/4. pp. 28-31.
- 23. HONSBERG C.D., BARNETT A.M., KIRKPATRICK D. (2006): Nanostructured Solar Cells for High Efficiency Photovoltaics, 2006. IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 2565-2568.
- 24. HULL R., BEAN J.C., (1993): Principles and Concepts of Strained-Layer Epitaxy, *Semiconductor and Semimetals*, 1993/33. pp. 1-67.
- 25. JASIK A., KOSIEL K., STRUPINSKI W., WESOLOWSKI M. (2002): Influence of covering on critical thickness of strained In_xGa_{1-x}As layer, *Thin Solid Films*, 2002/412. pp. 50-54.
- JI L.W., SU Y.K., CHANG S.J., CHANG C.S., WU L.W., LAI W.C., DU X.L., CHEN H. (2004): InGaN/GaN multi-quantum dot light-emitting diodes, *Journal of Chrystal Growth*, 2004/263. pp. 114-118.
- 27. KÁLMÁN E., KONCZOS G., CSANÁDY A. (2009): Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába, MTA Kémiai Kutatóközpont, ELTE Eötvös Kiadó, 2009.
- 28. KRESSEL H., NELSON H. (1969): RCA Review, 1969/30, pp. 105-107.
- 29. KUPHAL E. (1984): Journal of Crystal Growth 1984/67, pp. 441-442.
- 30. LANGER G. (2014): Vákuumfizika óravázlat <u>http://www.atomki.hu/atomki/</u>SNMS/oktatas/vakuumfizika_jegyzet.pdf Letöltve: 2014.03.17.
- LÁBADI Z., RÉTI I., RAKOVICS V., PÜSPÖKI S., TÓTH A., NÉMETH Á., VARGÁNÉ F. M., VERESNÉ V. K. (2004): Solar Cell Innovation Centre, Hungarian Academy of Scienses Research Institute for Technical Physics and Materials Science, Yearbook 2004. pp. 33-34.
- 32. LEITE M.S., WOO R.L., MUNDAY J.N., HONG W.D., MESROPIAN S., LAW D.C., ATWATER H.A. (2013): Towards an optimized all lattice-matched InAlAs/InGaAsP/InGaAs multijunction solar cell with efficiency>50%, *Applied Physics Letters*, 2013/102(3). pp. 33901-33905.
- 33. LIANG J.H.D., KANG Y., HUO Y., WANG K.X., KÉN JU., TAN (2009):
- LOHNER T., FRIED M., PETRIK P., POLGÁR O., GYULAI J., LEHNERT W. (2000): Ellipsometric characterization of oxidized porous silicon layer structures, *Mat. Sci. Eng.* 2000/69. pp.182–187.
- 35. Manitu Solar Kft.: Napelem típusok <u>http://napelem.net/napelemes_rendszer/</u> <u>monokristalyos_polikristalyos_napelem.php</u> - Letöltve: 2014.03.17.
- MARTI A., LÓPEZ N., ANTOLIN E., CÁNOVAS E., STANLEY C., FARMER C., CUADRA L., LUQUE A. (2006): Novel semiconductor solar cell structures: The quantum dot intermediate band solar cell," *Thin Solid Films*, 2006/511-512. pp. 638-644.

- 37. MARTI A., CUADRA L., LUQUE A. AFFILIATION A (2002): Design constraints of the quantum-dot intermediate band solar cell," *Physica E*, 2002/14. pp. 150–157.
- MASUI H., NAKAMURA S., DENBAARS S. P., MISHRA U. K. (2010): Nonpolar and Semipolar III-Nitride Light-Emitting Diodes Achievements and Challanges, IEEE 2010/1. Vol. 57. pp. 88-100.
- 39. MILTON C., DESCHANVRES J.L., JIMÉNEZ C., MACSPORRAN N., SERVET B., DURANT O., MODREANU M. (2007): Study of the growth conditions and characterization of CaCu₂O_x and SrCu₂O_x thin films, *Surface and Coatings Technology*, 2007/09. Vol. 201. pp. 9395-9399.
- 40. NEMCSICS Á., OLDE J., GEYER M., SCHNURPFEIL R., MANZKE R., SKIBOVSKI M. (1996): MBE Growth of Strained InGaAs on GaAs(001), *Physica Status Solidi A*, 1996/155. pp. 427-437.
- 41. NEMCSICS Á. (2003): Villamosenergia-termelés napelem segítségével, *Elektrotechnika*, 2003/3 sz. 270-273. o.
- 42. NEMCSICS Á. (2005): A napelemek működése, fajtái és alkalmazása, Budapest, BMF KVK.
- 43. NEMCSICS Á. (2006): Vékonyrétegekről, nanostruktúrákról a napelem ürügyén, *Fizikai szemle* 2006/9 sz. 293-299. o.
- 44. NEMCSICS Á. (2009): Új irányok a napelemes technológiában, *Elektronikai Technológia, Mikrotechnika*, 2009. 39-45. o.
- 45. NEMCSICS Á., RÉTI I., SERÉNYI M., TÉNYI G., HODOVÁN R, GÁBOR J., TAAR I., PÁNTOS J., BOZSIK J., MOLNÁR S., JANKÓNÉ R. M., (2009): Beszámoló a BMF-MTI és az MTA-MFA közös laboratóriumában található MBE berendezés üzembe helyezéséről, *Elektronikai Technológia, Mikrotechnika*, 2009. 33. o,
- 46. NEMCSICS Á. (2011): Novel Alternative for the GaAs-based Self-organized Quantum-structure," *Óbuda University e-Bulletin*, 2011. 1. o.
- 47. NÉMETH Á. (2009): ZnO vékonyrétegek vizsgálata, Budapest: PhD értekezés.
- NÉMETH Á., LÁBADI Z., RAKOVICS V., BÁRSONY I. (2007): Napelemtechnológiai Innovációs centrum az MTA MFA-ban, *Hiradástechnika*, 2007/10. 30-34. o.
- 49. NOZIK A.J. (2002): Quantum dot solar cells, *Physica E*, 2002/14, pp. 115-120.
- 50. OLSON J.M., FRIEDMAN D.J., KURTZ S. (2003): High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2003/9.
- 51. ORIEL PRODUCT TRAINING: Solar Simulation <u>http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/12298.pdf</u> - Letöltve: 2014.03.17.
- 52. PŐDÖR B. (2010): Érzékelők, Budapest, BMF KVK. 2010/2/18.
- 53. RÄUBER B. (2008): Solar cell technologies and their characteristics, PSE Projektgesellschaft Solare Energiesysteme mbH, Freiburg, Germany, 2008, p. 1-24.
- 54. RUSKE F., SITTINGER V., WERNER W., SZYSZKA B., DIETRICH K., RIX R. (2005): Hydrogen doping of DC sputtered ZnO:Al films from novel target material, *Surface & Coatings Technology*, 2005/200. pp. 236–240.
- 55. RUSKE F., PFLUG A., SITTINGER V., WERNER W., SZYSZKA B., CHRISTIE D.J. (2008): Reactive deposition of aluminium-doped zinc oxide thin films using high power pulsed magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 2008/516. pp. 4472–4477.
- 56. SANGSTER R. (1962): Preparation of III-V Compound, *Compound Semiconductor*, Reinhold Publishing Co., New York 1962/1.
- 57. SCHAFF W.J., TASKER P.J., FOISY M.C., EASTMAN L.F. (1993): Device Application of Strained-Layer Epitaxy, *Semiconductor and Semimetals* 1993/33. pp. 73-132.
- 58. SCHICHO S. (2011): Amorphous and microcrystalline silicon applied in very thin tandem solar cells, Forschungszentrum Jülich, 2011, vol. 99.
- 59. SCHIFF E. A., HEGEDUS S., DENG X. (2011): Amorphous Silicon–based Solar Cells, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Chichester, 2011/12.
- 60. SMITH F.T.J. (1983): Metalorganic chemical vapor-deposition of oriented ZnO films over large areas, *Applied Physics Letters*, 1983/43. p. 1103.
- 61. SURAPRAPAPICH S., THAINOI S., KANJANACHUCHAI S., PANYAKEOW S. (2006): Quantum dot integration in heterostructure solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006. pp. 2968.–2974.
- 62. TAKAGI T., MATSUBARA K., YAMADA K. (1978): Ionized-cluster beam epitaxy, *Cryst. Growth* 1978/45. p. 318.
- 63. WENG G.E., LING A.K., LV X. Q., ZHANG J. Y., ZHANG B. P. (2011): "III-Nitride-Based Quantum Dots and Their Optoelectronic Applications," *Nano-Micro Letters*, 2011. pp. 200-207.
- 64. WOO R.L., HONG W.D., ATWATER H. A., LAW D. C. (2011): First demonstration of monolithic InP-based InAlAs/InGaAsP/InGaAs triple junction solar cells, *37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 2011. pp. 295-298.

M2: A témakörhöz kapcsolódó saját irodalom

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.
- 4. 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.

Nemzetközi konferencia kiadvány

19. Schanda J., **Réti I.** (1989): Stability of V(lambda)-detectors under daylight irradiation, Daylight and solar radiation measurement conference, 1989/10, Berlin, pp. 125-126.

- Rácz M., Réti I., Ferenczi S. (1991): Realization of D65 illuminator in the visible range by filtered halogen incasdencend lamp, Color '91. conference, 1991/6, Plovdiv, pp. 89-91.
- Makai J.P., Balázs J., Döbrentei L., Makai J.J., Réti I. (1998): Realisation of the van Cittert monochromator system for high-accuracy mid-IR spectrophotometry and spectroradiometry, San Diego, USA 19/07-23/07/1998 SPIE Vol. 3437, pp. 75-82..
- Makai J. P., Balázs J., Döbrentei L., Réti I. (2000): Characterization of the van Cittert monochromator based IR spectrophotometer, San Diego, USA 29/07-04/08/2000 SPIE Vol. 4131, pp. 88-95.
- 23. Kucsera P., Tényi V. G., Nemcsics Á., Réti I. (2010): Control of the MBE Equipment for Growth of Nano Structures, 8th International Symposium on Intelligents Systems 2010/9, Subotica, Serbia, IEEE Proc. pp. 659-661.
- Réti I., Plósz B., Bátori G., Kucsera P., Tényi V. G., Nemcsics Á. (2011): Precision mechatronical system for molecular beam control, 1st Regional Conference-Mechatronics in Practice and Education MECH-CONF 2011. Subotica, Serbia, pp. 326-329.
- 25. Réti I., Tényi V. G., Kupás-Deák B., Kucsera P., Bátori G., Mieville A., Gruber S., Nemcsics Á. (2011): Electro-mechanical problems related to the out-heating of the vacuum chambers of the molecular beam epitaxy, 1st Regional Conference-Mechatronics in Practice and Education MECH-CONF 2011. Subotica, Serbia, pp. 330-334.

Magyar nyelvű konferencia kiadvány

- Rakovics V., Réti I., Bársony I. (2007): Vízben oldott szénhidrogének meghatározása infravörös abszorbciós módszerrel, Műszaki Kémiai Napok, Veszprém, 2007/04, 359-360. o.
- 27. Rakovics V., Réti I. (2008): Infravörös diódák alkalmazása az élelmiszerek spektroszkópiai vizsgálatára, Műszaki Kémiai Napok, Veszprém, 2008/04, 64-68. o.
- 28. Tényi V.G., Nemcsics Á., Kucsera P., **Réti I.** (2010): MBE berendezés irányítása ipari vezérlővel, XXVI. International Kandó Conference, 2010/10, 8-9. o.
- Réti I., Nemcsics Á., Harmat P., Tóth L., Tényi V.G., Kucsera P., Kupás Deák B., Amadou M., Hodován R., Mészáros S., Battistig G., Bársony I. (2010): Az MBE berendezés installálásának műszaki kérdései, XXVI. International Kandó Conference, 2010/10, 12-13. o.
- 30. **Réti I.**, Rakovics V., Ürmös A., Nádas J. (2014): Nanostruktúrás LED-ek, V. LED Konferencia, Budapest, 2014/02, 41-42. o.

Nemzetközi konferencia abstract

31. Rakovics V., Balázs J., Réti I., Püspöki S., Lábadi Z. (2002): Near-Infrared Transmission Measurements on InGaAsP/InP LED Wafers, 6th International Workshop on Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technolgies, May 2002, Budapest, Hungary, Book of Abstracts, p. 150.

- 32. Horváth Zs. J., Makhniy V. P., Demych M. V., Vo Van Tuyen, Balázs J., Réti I., Gorley P. M., Ulyanitsky K. S., Horley P. P., Stifter D., Sitter H., Dózsa L. (2000): Electrical and photoelectrical behaviour of CdTe structures, 5th International Workshop on Expert Evaluation and Control of Compound Semicond. Materials and Technologies, May 21.-24. 2000, Heraklion, Crete, Greece, Book of Abstracts, P-006poster.
- Réti I., Farkas I. (2013): MBE Technolgy for High Efficiency GaAs Based Solar Cell Preparation, 19th Workshop on Energy and Environment, Okt. 24-25. 2013, Gödöllő, Hungary, Book of Abstracts, p. 9.
- 34. Rakovics V., Réti I. (2013): Near infrared luminescence of CdS:Cu thin films prepared by chemical bath deposition, 8th International Workshop on Solid State Surfaces and Interfaces, Nov. 25.-28. 2013, Smolenice Castle, Slovak Republic, Book of Abstracts pp. 151-152.

Magyar nyelvű konferencia abstract

- 35. Rakovics V., Püspöki S., Balázs J., Réti I., Serényi M. (2000): Félvezető sugárforrások a közeli infravörös spektroszkópiában, Magyar Regula Szimpózium, Perspektívák és eredmények az optikai kutatások hazai és nemzetközi projektjeiben, Budapest, 2000/09, P-013-poszter.
- 36. **Réti I.**, Nemcsics Á. (2012): Molekulasuárepitaxia a LED-előállításában, III. LED Konferencia, Budapest, 2012/02, P-008-poszter.

Hivatkozások

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. című munkára:

1. Muray K .:

Photometry of diode emitters: light emitting diodes and infrared emitting diodes Applied Optics, 1991/16 Vol. 30, pp. 2178-2186,

Makai J.P., Balázs J., Döbrentei L., Makai J.J., **Réti I.** (1998): Realisation of the van Cittert monochromator system for high-accuracy mid-IR spectrophotometry and spectroradiometry, San Diego, USA 19/07-23/07/1998 SPIE Vol. 3437, pp. 75-82. című munkára:

 Makai J. P., Balázs J., Döbrentei L., Réti I.: Characterization of the van Cittert monochromator based IR spectrophotometer San Diego, USA 29/07-04/08/2000 SPIE Vol. 4131, pp. 88-95.

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. című munkára:

1. Deshayes Y., Bechou L., Verdier R., Danto Y.: Long-term reliability prediction of 935 nm LEDs using failure laws and low acceleration factor ageing tests Ouality and Reliability Engineering International, 2005/6. pp. 571-594, független, 2. Bechou L., Rehioui O., Deshayes Y., Gilard O., Quadri G., Ousten Y.: Measurement of the thermal characteristics of packaged double-heterostructure LEDs for space applications using spontaneous optical spectrum properties Optics and Laser Technology, 2008/4. Vol. 40. pp. 589-601, független, 3. Grym J., Procházková O., Zavadil J., Žďánský K.: Role of rare-earth elements in the technology of III-V semiconductors prepared by liquid phase epitaxy Semiconductor Technologies, InTech, Rijeka, (2010) pp. 295-320, független, 4. Ahmetoglu M., Ozer M., Kadirov O.: Photoelectrical properties of InP-InGaAsP heterojunction avalanche photodiodes Optoelectronics and Advanced Materials, 2009/6. Vol. 3. pp. 608-611, független, 5. Pei G., Xia C., Wu F., Zhang J., Wu Y., Xu J.: Homoepitaxial growth of ZnO films via low-temperature liquid-phase epitaxi Materials Letters, 2007/11-12. Vol. 61. pp. 2299-2302, független, 6. Malinen J, Lindström H.: Spectral Radiant Flux Measurements for Infrarad Light Emitting Diodes and Halogen Lamps http//:www.vtt.fi/ele/tuloksia/pdf_files/vtt_ope_tiet_vk_04.pdf, 2013. 12. 05.

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. című munkára:

 Ürmös A., Farkas M.,Kóczy T. L., Nemcsics Á.: Quantum Structure Classification by Kohonen Self-Organizing Map and by Fuzzy C-Means Algorithm IEEE International Conference on System Science and Engineering, July 4-6, 2013 978-1-4799-0009-1/13/\$31.00 2013©IEEE: Book of Abstracts pp. 313-318.

Egyéb

37. Rácz M., Schanda J., Ferenczi S., Réti I. (1994): Optikai elrendezés, illetve optikai feltét tárgylecsével ellátott optikai műszerhez, valamely felület mérendő részének kijelölésére és a kijelölt rész optikai sugárzási tulajdonságainak, előnyösen fénysűrűségének mérésére, Szabadalom lajstromszám 208 175.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Farkas István professzor úrnak a kutatómunkám végzéséhez szükséges feltételek, valamint a megfelelő tudományos fórumokon való publikálási lehetőségek biztosítását. Köszönöm hasznos tanácsait és ösztönzését.

Köszönöm Galambos Eriknek a SZIE Msc. végzett hallgatójának, hogy sok gyakorlati problémában segítséget nyújtott.

Köszönöm Géczyné Dr. Víg Piroska segítségét.

Általában köszönöm a Fizika és Folyamatirányítási Tanszék munkatársainak minden segítségét és a kedves, emberséges környezetet, amelyben jó volt dolgozni.

Köszönöm igazgatómnak Dr. Bársony István professzor úrnak és munkatársaimnak az MTA MFA-ban Battistig Gábornak, Harmat Péternek, Hornyik Hangának, Lábadi Zoltánnak, Nemcsics Ákosnak, Németh Ágostonnak, Makai Jánosnak, Rakovics Vilmosnak, Schanda Jánosnak, hogy a támogató hátteret biztosították.

Nem utolsó sorban köszönöm az Óbudai Egyetemről Kupás – Deák Bélának, Ürmös Antalnak, Tényi Gusztávnak, Nagy Lajosnak és Báthori Gergőnek az önzetlen segítség nyújtásukat.

Kiemelten köszönöm családom és barátaim segítségét, főleg feleségem és gyermekeim nélkülözhetetlen lelki támogatását.

Köszönetemet fejezem ki mindazok felé, akiket név szerint ugyan nem tudtam itt megemlíteni, de valamilyen módon hozzájárultak e munka létrejöttéhez.

Budapest, 2015. március 24.

Réti István