



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

**TÉZISFÜZET**

---

**Nádas József**

**LED-ek sávszélesítése közeli  
infravörös spektroszkópiai és  
világítástechnikai alkalmazásokban**

Témavezető:

**Dr. Rakovics Vilmos**

## 1. A kutatás előzményei

A LED-ek óriási fejlődésen mentek keresztül az utóbbi két évtizedben, a világítástechnika meghatározó fényforrásává váltak, olyan forradalmi változást hozva a mesterséges világítási eszközök közt, melyet talán csak az izzólámpa megjelenéséhez lehet hasonlítani. A háztartási izzók retrofit LED lámpákkal történő leváltásától kezdve a különböző középületi világítótesteken keresztül a speciális sport- és díszvilágítási eszközökig mindenütt leváltották a korábbi hagyományos fényforrásokat. Hasonló történt az autópárházban, a kijelzők, TV-k háttérvilágítását szolgáló fényforrások esetében és sok más speciális szakterületen is.

Ugyanezen időszakban – többek közt az elektronikai eszközök és nyomtatott áramkörök további miniaturizálásának és az akkumulátorok egyre nagyobb energiasűrűségének köszönhetően – megnövekedett az igény az ipari és laboratóriumi optikai műszerek területén is a kis méretű, könnyű, hordozható eszközök fejlesztése iránt, melyekhez a korábbi izzólámpás vagy nagyobb teljesítményigénnyel rendelkező más beépített fényforrások kiváltása szükséges kisebb, elektromos és spektrális szempontból is optimalizált, speciális LED fényforrásokkal. A műszergyártás egyike lett a legkorábban és egyben legkésőbb fényforrást váltó világítástechnikai alkalmazási területeknek. Egyes optikai elven működő műszerekbe olyan, nem látható tartományban sugárzó fényforrások (sugárforrások) szükségesek, melyek már a LED-ek világítástechnikai célú széles körű elterjedése előtt is rendelkezésre álltak, de sok műszerhez olyan szélessávú LED kell, melyek még nem, vagy csak néhány éve állnak rendelkezésre.

**A LED fényforrások fejlesztése egy folyamatosan és dinamikusan fejlődő részterülete a világítástechnikának, ahol a LED-ek hatékonyságának további növelése helyett egyre inkább a spektrális minőségi paramétereik fejlesztése kerül előtérbe.**

**A LED-ek keskeny spektrumban sugároznak, ez energetikailag a legnagyobb előnyük, hiszen pont ott adják le az energiát, ahol arra szükség van és a LED-ek az anyagrendszerek kiválasztásával olyan „színűre” (hullámhosszúságúra) készíthetők, amelyre épp szükség van. Ez óriási előny a széles spektrumban sugárzó izzólámpák és a hullámhossz átalakítást igénylő kisülőlámpák felesleges sugárzási veszteségeihez képest. Ugyanakkor ez a LED-ek legnagyobb**

**hátránya is egyben:** a legtöbb alkalmazáshoz, beleértve a hétköznapi világítást is, túl keskeny ez a sáv. A világítástechnikában a kék LED + sárga fényporos megoldás dominál, ez a közismert módja a sávszélesítésnek, de a fényporos hullámhossz átalakítás a LED-eknél is jelentős veszteséggel jár és színminősége további fejlesztésre szorul. **Világszerte, a LED-ekkel kapcsolatos kutatások egyik fókusza a hatékony sávszélesítés.**

Munkám során az egyik ilyen fontos felhasználási területtel, a közeli infravörös (NIR) spektroszkópiával kerültem kapcsolatba. **Gyakorlatilag a teljes NIR tartományban jól hangolható hullámhosszúságú félvezető a GaInAsP, ezért ezt helyeztem a középpontba.** A cél, hogy a fényporos sávszélesítésnél pontosabb és hatékonyabb, a műszeres mérések céljaira jobban használható sávszélesítési módszert dolgozzak ki. **Kiemelt szempont volt a kéziműszeres alkalmazhatóságban való hasznosíthatóság, azaz a kis fogyasztás, kis méret, a több sugárzási hullámhossz ellenére a valódi pontszerűség, és a hőmérsékletfüggetlenség a temperálási energiaveszteségek elkerülése végett.**

A kutatás jelentős része az NIR LED újszerű felépítése, működése, növesztése köré csoportosult, így a dolgozatomban azt fogom részletesebben bemutatni. **A világítás célú LED-ek esetén a a vizuális komfort növelése céljából történő kutatásomból szeretném a hasonló sávszélesítési probléma megoldását szembe állítani a NIR LED-es megoldással.** A sávszélesítési vizsgálatokat kiterjesztettem a világítástechnikára is: kis fényportartalmú fehér LED-ekkel és vörös LED-ekkel megvalósított **hibrid LED-ek spektrális jellemzőit és funkcionális megfelelőségét vizsgáltam különböző színvisszaadási rendszerekben.**

Mindkét esetben gyakorlatias, eredményszemléletű munkát kívántam folytatni, a NIR esetében olyan LED-et készíteni, mely **a GaInAsP anyagrendszerben még soha nem készült el korábban** és később termékként is van benne lehetőség, a VIS kutatásban pedig olyan eredményt, ami a mindennapi vizuális környezetünk, pl. a lakásvilágítás jobbá tételéhez járul hozzá. Az egyes részterületeken elért **eredmények felhasználhatók más LED-ek esetén is: pl. az emberközpontú világítás vagy a növényvilágítás részterületeiről a műszergyártásban használt LED-ek továbbfejlesztéséhez és fordítva.**

## 2. Célkitűzések

A későbbi, szerves anyagok és biológiai minták vizsgálatára használható NIR spektroszkópiás kéziműszeres LED fényforrások fejlesztéséhez alkalmas, GaInAsP/InP vegyületfélvezető rétegszerkezeti kutatással kapcsolatos céljaim összefoglalva:

- **Egyetlen chip előállítására alkalmas rétegszerkezet (nem diódasor).**
- **Csúcshullámhosszúsága a NIR II. tartományában hangolható.**
- **Tartalmaz sávszélesítést biztosító megoldást, de nem utólagosan felvitt fényorréteggént.**
- **Pontszerűség megőrzése érdekében a sávszélesítést biztosító réteg optikai tengely irányú mérete nem haladja meg a fényt kibocsátó felület nagyságát.**
- **A sávszélesítéssel átfogott hullámhossz-tartomány legalább két funkciós csoport, lehetőleg az -OH és a -CH azonos számú felharmonikusainak hullámhosszát fedje le.**
- **Jó hatásfokú, kis fogyasztású, kis méretű chip legyen előállítható segítségével.**
- **A mérési hullámhossz-tartományban spektruma legyen közel hőmérsékletfüggetlen.**
- **A mérési szögterületben spektruma legyen közel irányfüggetlen.**

A világítástechnikai részterület esetében a sávszélesítés kiterjesztése a fényforrás felhasználásának és veszteségének csökkentése érdekében:

- **Kevés fényport tartalmazó fehér LED és vörös LED felhasználásával hibrid LED fényforrás és világítótest megvalósítása.**
- **Fehér LED sávszélesítésének vizsgálata sugárzási hatásfok és színvisszaadás szerint, összetevők jellemzőinek optimalizálása.**
- **A fényforrásfelhasználás, hatásfok és színminőség egymásra hatásának értékelése.**

### 3. Vizsgálati módszerek

A kísérleti LED-eket folyadékfázisú epitaxia (LPE) módszerével növesztettem. Az LPE berendezés reaktorcsöve kvarcból készült, körkörös speciálisan tekercselt önhordó kantál spirál fűtéssel. A reaktorcsövet koncentrikusan körbevevő kemence vagy más szóval kályha, szintén kvarccsőből készült, belsején PVD eljárással gőzölt vékony aranyréteggel, melynek az elsődleges célja hővisszaverés. A reaktortérben a csónak grafitból készült. Az olvadékokat tartalmazó része cserélhető, a szükséges cellák számától függően. Az állórészben szintén cserélhető fészek tette lehetővé a eltérő méretű hordozók befogadását. A növesztések  $H_2$  védőgázban történtek. A hőmérsékletet két Pt/Pt-Rd hőelem érzékelte, közvetlenül a vezérlő egységbe csatlakoztatva. A vezérlés programozható elektronikus mozgató berendezéssel és hőmérséklet vezérlővel történt.

A kísérletek fókuszában egy olyan GaInAsP/InP szerkezet növesztése és vizsgálata állt, mely az ebben az anyagrendszerben szokásos rétegeken kívül egy lumineszkáló réteget is tartalmaz. A lumineszkáló réteg a hipotézis szerint az aktív rétegből érkező sugárzás egy részét elnyeli és nagyobb hullámhosszúságon sugározza ki, így a LED egyszerre több sugárzási csúcsot valósít meg. A sugárzási csúcsok hullámhossza a vegyületfélvezető rétegek összetételével, míg intenzitásuk a rétegek vastagságával állítható be.

A tervezés során a választott hullámhosszúságoknak, ezzel együtt tiltott sávoknak megfelelő rácsillesztett összetevőket határoztam meg, ezekből számítottam a szilárd fázisok összetételét. A beoldódó megoszlási hányadosokra polinom függvények illeszthetők, melyek segítségével számíthatók az olvadékfázisban levő móltörtök. Utóbbiakból származtatható a bemérendő Ga, As és P tartalom, melyeket előzetesen kiszámoltam. Ezzel együtt meghatároztam az egyes rétegekhez tartozó hőmérséklet-idő adatpárokat is. A bemérendő mennyiségeket és a növesztési paramétereket táblázatokban rögzítettem, az egyes növesztésekből származó LED-ek egyedi sorszámot kaptak a későbbi vizsgálatokban való azonosítás érdekében.

A kísérleti LED-ek – a kéziműszeres alkalmazási célterülethez illeszkedően –  $300 \times 300 \mu\text{m}^2$  alapterületű,  $I_{\text{névl}} = 50 \text{ mA}$  áramerősségű chip-ek voltak. Az aktív és lumenáskáló réteg sugárzásának csúcshullámhosszúságait a tokozatlan LED-eken NIR spektrométerrel végzett spektrális transzmisszió méréssel igazoltam. Mivel a transzmisszió mérés közben a LED passzív, egyáltalán nem melegszik, pontosabb érték kapható, mint aktív állapotában az emisszió méréssel. A sugárzási csúcsok a spektrális transzmissziós görbe első deriváltjának helyi maximumai, melyek tolerálható szórással a tervezettnél megfelelő hullámhosszúságúak voltak.

A sugárzási csúcsok intenzitásait és intenzitás-arányait spektrális emisszió méréssel vizsgáltam, DC táplálással, tús mérőmikroszkóppal és NIR spektrométerrel. Az emissziós mérésekkel igazoltam, hogy a lumineszkáló réteg beépítése működőképes konstrukció, a két sugárzási csúcs nagysága és azok intenzitás-aránya – tolerálható hibahatáron belül – a tervezett volt.

A mobil spektroszkópiás alkalmazás szempontjából lényeges hőmérsékletfüggés mérése konstans áramerősség mellett, változó hőmérsékleten, spektrális intenzitásméréssel történt. Ezek már fém tokozott LED-ek voltak, a hőmérsékletmérés a tokon történt. Az elméleti modellkísérlethez szükséges bemenő adatokat lumineszkáló réteg nélküli (egy csúccsal sugárzó) LED-ek hőmérsékletfüggő intenzitásainak mérésből kaptam. A modellel megtervezett két sugárzási csúcsú LED-ek közel hőmérsékletfüggetlen szakasszal rendelkeztek. A modellek alapján növesztett LED-eket  $30\text{--}100^\circ\text{C}$  közti hőmérsékleten spektrális intenzitásméréssel ellenőriztem. A közel hőmérsékletfüggetlen szakaszok a két sugárzási csúcs közt alakultak ki, ha a csúcsok közt  $\Delta\lambda_p < 110 \text{ nm}$  volt a távolság, ahol a hőmérséklettől függő relatív intenzitás változás a vártnál is kisebb lett. Távolabbi sugárzási csúcsok esetén  $30\text{--}50^\circ\text{C}$  közt alakultak ki közel hőmérsékletfüggetlen szakaszok.

A kézi mérés irányának lehetséges pontatlansága miatt a lumineszkáló LED spektrális irányfüggését is vizsgáltam, az optikai tengelytől mért

$\pm 20^\circ$ -os tartományban. A mérések NIR spektroradiométerrel, stabilizált áram és hőmérsékleti paraméterek mellett történtek. A lumineszkáló réteg kissé felerősítette az aktív rétegből származó (és a lumineszkáló rétegen áthaladó) sugármenetek spektrális irányfüggését, de így is alacsony maradt. A lumineszkáló rétegben keletkező sugárzás irányfüggése elhanyagolható volt. Összességében, a beépített lumineszkáló réteg nem befolyásolta LED spektrális irányfüggését a felhasználási célt veszélyeztető mértékben.

A LED hosszútávú működés érdekében intenzitásra stabilizált, ezért meghajtó árama változhat. Ez különösen az öregedéssel járó intenzitáscsökkenés kompenzálása esetén fontos tényező. Ezért vizsgálnom kellett a meghajtó áram változásával együtt járó spektrális intenzitás változás mértékét. Ez Peltier elemes hőmérséklet stabilizálással állandó szobahőmérsékleten tartott tokkal történt. Annak érdekében, hogy a tok és az aktív réteg közt minél kisebb legyen a hőmérséklet különbség, a LED-et QCW üzemmódban PWM tápegységről hajtottam meg. A PWM kitöltési tényezője mindig 1/1000 volt. A mérések alapján ez a mérési módszer a névleges áram kétszereséig nem okozott az aktív rétegben kimérhető melegedést, ezért a spektrális intenzitás méréseket eddig lehetett elvégezni. A névleges alatti és azt legfeljebb kétszeresen meghaladó különböző áramerősségek esetén a spektrális intenzitás eltérések jelentéktelenek voltak a két sugárzási csúcs közt, ha az aktív réteg hullámhossza 1300 nm-t nem haladta meg.

A lumineszkáló GaInAsP LED spektroszkópiai célú gyakorlati alkalmazhatóságának bizonyítására mérési modellkísérletet végeztem. A cél etanol kimutatása volt a vízben. Az etanol jó modellanyag, jól reprezentálja szerves anyagok mérését a gyakorlatban. Az etanol-víz elegy szokásos vizsgálata egy korábbi, szabadalommal védett eljárásban három különálló LED-del három hullámhosszon történt. Igazoltam, hogy a lumineszkáló GaInAsP LED két hullámhosszágú sugárzásával és egy szendvicsdetektorral a kéziműszerektől elvárható pontosságú koncentrációmérést lehet végezni az etanol-víz rendszerben.

A GaInAsP vegyületfélvezetők magasabb Ga tartalmú összetételeinél magas a visszaoldódási hajlam az InP olvadékba, ezért visszaoldódásgátló réteg kerül növesztésre a lumineszkáló réteg elé. Ez a réteg vastagságában és összetételében tervezhető, hangolható. Ez esetben abszorbeáló réteggént funkcionál. Az abszorbeáló rétegben felszabaduló elektronok csak egyirányban, a lumineszkáló réteg felé tudnak vándorolni, így az energiaátalakítás elvben 100% hatásfokú, de a hullámhossz különbség miatti kvantumvesztés természetesen fennáll. A kísérlet keretei közt a lumineszkáló réteg belső konverziós hatásfokát is modelleztem, majd spektrális emisszió méréssel mértem. A mérések alapján e hatásfok közel 100%-os. Ez sokkal jobb, mint a LED-eknél közismert fényporos sávszélesítési módszer átalakítási hatásfoka.

Az abszorpciós és lumineszkáló réteggel növesztett LED ek esetén a rétegvastagságok és összetételek megfelelőségének igazolása X EDS SEM (röntgensugaras energia diszperzív spektrométeres, pásztázó elektron mikroszkópos) mérésekkel, az aktív réteg hibamentes működésének igazolása EBIC (elektronsugárral indukált áram) mérésekkel történt. A vizsgálatok során lehetőség nyílt növesztési rendellenességek, hibahelyek felfedezésére is. Az összetételek, a rétegvastagságok és a csúcshullámhosszúságok hangolása is a várt, kis gyártási szóráson belül történt. A mért eredmények összhangban voltak a tervezett értékekkel.

A lumineszkáló réteg világítástechnikai hasznosítása korlátozott. Ennek okai a világítástechnikai célú LED-ek eltérő anyagrendszerei és az emberi látás 400 nm-es spektrális szélessége. Ezért a látható tartományban olyan kísérlettel egészítettem ki munkámat, mely a rossz színvisszaadási tulajdonságokkal rendelkező, de viszonylag kevés fényport tartalmazó világítási célú LED-ek spektrumát vörös fényű LED-del egészíti ki. Ez esetben a sávszélesítést részben a fehér LED-től különálló másik LED biztosítja, ezek együttes alkalmazása a hibrid LED. Azt vizsgáltam, hogy mennyivel romlott a hibrid LED a sugárzási fényhasznosítása a fehér LED-hez képest a vörös LED fényének valamely arányú hozzáadásával. A kísérletekben 3 különböző



színhőmérsékletű fehér és 2 eltérő csúcshullámhosszúságú vörös fényű LED 6 féle kombinációját vizsgáltam. Azt kerestem, hogy melyik kombinációban, azon belül a vörös LED fényének mekkora arányú felhasználásával lehet a legjobb eredményt elérni, valamint ez mekkora sugárzási hatásfokcsökkenéssel járt együtt. A mérésekhez DC meghajtást, Ulbricht-gömböt és VIS tartományban működő spektroradiométert használtam. A kísérlet különlegessége, hogy a méréseket követően CRI, CQS és TM-30 színvisszaadási rendszerben is kiszámoltam a színvisszaadási értékeket, ezeket összehasonlítottam.

A fenti LED kombinációkból demonstrációs világítótesteket is készítettem. Az előző kísérlettel szemben itt kifejezetten a relatív fotometriai fényhasznosítás változást vizsgáltam. Az egyik változó a vörös LED fények különböző arányú keverése volt a fehérhez, a másik két változó a fehér és a vörös LED-ek áramerősségei voltak. A vizsgálat eredménye az optimális vörös-fehér fény arány megtalálása volt. Ennél az aránynál a hibrid LED bármely vizsgált színvisszaadási rendszerben a legjobb eredményt nyújtja a lehető legkisebb fényhasznosítás csökkenés mellett.

## 4. Új tudományos eredmények

1. **Bebizonyítottam, hogy a GaInAsP/InP anyagrendszerben olyan rétegszerkezettel rendelkező LED hozható létre, amelyben az aktív rétegen kívül egy másodlagos, hangolt összetételű kvaterner réteg (lumineszkáló réteg) a primer sugárzás egy részét elnyeli és hosszabb hullámhosszúságon sugározza ki, így egyetlen LED képes egyszerre két közeli infravörös hullámhosszon sugározni. Az eredmény jelentőségét az adja, hogy ebben az anyagrendszerben ezt korábban még nem valósították meg.** A hullámhosszak a kvaterner rétegek összetételének tervezésével, a csúcsok intenzitásainak arányai a rétegvastagságok tervezésével állíthatók be. A hullámhosszúságok tervezettnek való megfelelését transzmissziós és emissziós vizsgálatokkal igazoltam, az átlagos eltérés  $\Delta\lambda_{av} = 4$  nm volt. [S1] [S2] [S3] [S4] [S6] [S9] [S12]
2. **Kísérletekkel bizonyítottam, hogy a lumineszkáló réteggel létrehozott két hullámhosszon sugárzó GaInAsP/InP anyagrendszerű LED a közeli infravörös tartományban alkalmas hőmérsékletfüggetlen sugárforrásként.** Közeli (110 nm-nél közelebbi) csúcshullámhosszúságok esetén a csúcsok közt alakul ki csekély hőmérsékletfüggésű (legfeljebb 2% relatív intenzitásváltozású, a gyakorlatban előforduló hőmérsékleti határok közt közel hőmérsékletfüggetlen) szakasz, melynek szélessége megegyezik a két csúcs távolságával. Távolabbi (110 nm-nél messzebb levő) csúcsok esetén a félértékszélességek magasabb hullámhossz határainak környezetében alakul ki egy-egy viszonylag széles, de minimum a félértékszélesség negyedének megfelelő szélességű, csekély hőmérsékletfüggésű (legfeljebb 2% relatív intenzitásváltozású, a gyakorlatban előforduló hőmérsékleti határok közt közel hőmérsékletfüggetlen) szakasz. [S2] [S3] [S4] [S5] [S6] [S7] [S9]
3. **Megállapítottam, hogy a két hullámhosszon sugárzó GaInAsP/InP anyagrendszerű LED lumineszkáló rétege az optikai tengelyhez képest  $\pm 20^\circ$  szögtartományon belül a LED**

- térbeli spektrális intenzitás függését alig változtatja meg, így a LED alkalmas NIR spektroszkópiai felhasználás céljára.** Az optikai tengelyhez képest  $\Delta\beta \leq \pm 20^\circ$  tartományban a lumineszkáló réteg irányfüggése elhanyagolható (mérési bizonytalanságon belüli), az aktív réteg spektrumának irányfüggése pedig csak csekély mértékben romlik más hasonló hullámhosszúságra tervezett, de lumineszkáló réteg nélküli LED-hez képest. Az aktív réteg spektrális intenzitás függése a lumineszkáló réteg beépítésének hatására legfeljebb 9% relatív intenzitásváltozást mutatott az optikai tengelytől mért legtávolabbi ( $20^\circ$ -os) szögben. [S5]
4. **Bebizonyítottam, hogy GaInAsP/InP anyagrendszerű lumineszkáló LED szobahőmérsékleten, 1300 nm-nél kisebb csúcshullámhosszúságok esetén (kézi spektroszkópiás célterület körülményei közt), a névlegestől az azt legfeljebb kétszeresen meghaladó áramerősségig meghajtva, a spektrális összetétele és relatív intenzitása gyakorlatilag áramfüggetlen.** A GaInAsP/InP anyagrendszerű két csúcshullámhosszúságú lumineszkáló LED-et a névleges áramerősség és annak duplája közt DC üzemben meghajtva, a két csúcshullámhossz közt legfeljebb 1.5% relatív intenzitásváltozás mérhető, a csúcshullámhosszúságok közt bármely hullámhossznál. [S5]
  5. **Bebizonyítottam, hogy a GaInAsP/InP anyagrendszerű LED aktív rétege és lumineszkáló rétege közt, a visszaoldódásgátló réteg vastagságának növelésével és összetételének kívánt hullámhosszra hangolásával olyan abszorbeáló réteg hozható létre, mely a lumineszkáló réteg számára elektronokat hoz létre az aktív réteg elsődleges sugárzásából. Az eredmény jelentőségét az adja, hogy ebben az anyagrendszerben ezt korábban még nem valósították meg.** Az ilyen rétegrenddel készített LED-eknél a hullámhosszúságok tervezettnek való megfelelést transzmissziós és emissziós vizsgálatokkal igazoltam, az átlagos eltérés a tervezetthez képest  $\Delta\lambda_{av} = 1.25$  nm volt. [S2] [S3] [S4] [S8]

6. **Megállapítottam mérésekkel igazoltan, hogy a két hullámhosszon sugárzó. lumineszkáló és azt kiegészítő abszorbeáló réteggel növesztett GaInAsP/InP LED-ek spektrumain és csúcshullámhosszain kívül a rétegek struktúrái, összetételei és vastagságai is a tervezetteknek megfelelnek, tehát ebben az anyagrendszerben az ilyen összetett rétegrendszerrel rendelkező LED konstrukcióra kidolgozott tervezési metodika megfelelő.** A mért rétegvastagságok eltérése a tervezettekhez képest a legpontosabban készült LED-ek esetében 1%-on belüli, a legkevésbé pontos minta esetén 5–10% közti volt. [S5] [S8]
7. **Kísérletekkel bebizonyítottam, hogy a látható tartományban kevés fényport tartalmazó, gyenge ( $R_f < 75$ ) színvisszaadású semlegesfehér ( $T_k > 5000$  K) LED és vörös ( $\lambda_p = 640$  nm) LED felhasználásával ideális melegfehér hibrid LED fényforrás és világítótest valósítható meg ( $R_f \geq 85$ ,  $R_g \geq 108$ ).** Ez a sávszélesítési módszer 13%-os sugárzási és fotometriai hatásfok csökkenés árán egyharmadával csökkenti a fényporfelhasználást. [S10] [S11]

## 5. Az eredmények hasznosítási lehetősége

Pontosított összetevő tervezéssel és folyadékfázisú epitaxiás (LPE) növesztéssel a GaInAsP/InP vegyületfélvezető anyagrendszerben sikerült olyan LED-et készíteni, mely egyszerre két hullámhosszon sugároz, mivel az aktív réteg sugárzásának egy részét egy lumineszkáló réteg egy másik hullámhosszúságú fénnyé alakítja. Az eredmény jelentőségét az adja, hogy ilyen konstrukciót ebben az anyagrendszerben korábban nem hoztak létre. A sugárzási csúcsok az összetételekkel, a relatív amplitúdók a rétegvastagságokkal pontosan tervezhetők. Az így kialakított LED alkalmas egyetlen sugárforrásként spektroszkópiás mérésre.

A pontszerű fémezésnek köszönhetően keskeny csatornában nagy áramsűrűség mellett koncentráltan keletkezik a fény, így maga a fényforrás is rendkívül pontszerű, 100  $\mu\text{m}$  nagyságrendű területen történik a fénykilépés. A keskeny tartományban ( $\pm 20^\circ$ ) a kibocsátott sugárzás spektruma gyakorlatilag irányfüggetlen.

A két csúcs közti hullámhossz tartományban a relatív spektrális emisszió, észszerű felhasználási körülmények közt, gyakorlatilag hőmérséklet- és áramfüggetlen.

A visszaoldódás megakadályozása érdekében ún. visszaoldódásgátló réteg növesztésére van szükség, e réteg tervezett összetételű és rétegvastagságú növesztésével egy abszorpciós réteg keletkezik, mely a lumineszkáló réteg számára töltéshordozókat hoz létre az aktív réteg elsődleges sugárzásából. Ilyen rétegrendet ebben az anyagrendszerben korábban nem hoztak létre. A sugárzási csúcsok az összetételekkel, a relatív amplitúdók a rétegvastagságokkal pontosan tervezhetők.

A lumineszkáló réteg hullámhosszkonverziójának belső hatásfoka közel 100%, mely jóval meghaladja a fényporos megoldásokat.

A munka eredményeként létrehozott LED alkalmas két hullámhosszon vagy közeli csúcsok közti tartományokban történő NIR spektroszkópiás mérésekhez egyetlen pontszerű sugárforrásként, lényegesen leegyszerűsítve és pontosabbá téve a mérést. A kis méret és fogyasztás, valamint a hőmérsékletfüggetlen jellemzők miatt a temperálás

energiaigényének mellőzhetősége miatt különösen alkalmas mobil készülékek sugárforrásául.

A konstrukció szabadalmi oltalmat élvezett, melynek fenntartása anyagi okok miatt időközben megszűnt. A két sávon sugárzó GaInAsP/InP LED, az egyedi igények (hullámhossz és egyéb paraméterek) megadásával a kutatóintézetben termékként rendelhető.

A rétegek felépítése, vastagságai, összetételei és működése megfelelt a tervezettnek, ezeket a rétegeket analizáló X EDS SEM és EBIC vizsgálatokkal igazoltam, ezen keresztül bizonyítottam az abszorbeáló és lumineszkáló rétegrendszer tervezésére vonatkozó módszer helyességét.

Az így készült két sávon sugárzó GaInAsP LED konstrukció alkalmas mérés-technikai célú továbbfejlesztésre, NIR spektroszkópiás kéziműszeres alkalmazásra, de a sávszélesítési módszer elvben a világítási célú LED ek fejlesztésére, a fényforrás részbeni kiváltására is alkalmas lehet.

A fényforrás részleges kiváltására, sávszélesítésre, a látható tartományban is végeztem vizsgálatokat. A világítástechnika melegfehér LED-jeivel szemben támasztott követelmények semlegesfehér LED és piros LED felhasználásával készült hibrid LED-del is megvalósíthatók. Ez a sávszélesítési módszer 13%-os sugárzási és fotometriai hatásfok csökkenés árán egyharmadával csökkenti a fényforrásfelhasználást, miközben a színvisszaadás és a telítettség értékek mind a fényforrás, mid az abból készített világítótest esetén messze meghaladják az elvárt értékeket.

## 6. Tézispontokhoz kapcsolódó saját közlemények

- [S1] Réti István, Rakovics Vilmos, Ürmös Antal, **Nádas József**: Nanostruktúrák LED-ek, in: Elektrotechnika, 107.évf. 11. szám (2014/11) pp.19-21; HUISSN 0367-0708
- [S2] **József Nádas**, Vilmos Rakovics: High Intensity Broad Spectrum LEDs in the Near Infrared Range; in: Materials Science Forum vol. 885., Materials Science, Testing and Informatics VIII., 2017., pp.141-146, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.885.141
- [S3] **József Nádas**: GaInAsP/InP LEDs for Application in Near Infrared Spectroscopy in: Ákos Borbély: Proceedings of the International Conference On Design And Light Industry Technologies 19 – 20 November 2014, Budapest, Hungary, pp.49-54. RKK Óbuda University ISBN 978-615-5460-33-3
- [S4] **Nádas József**, Rakovics Vilmos: Félvezető fényforrások a közeli infravörös spektroszkópiában; in: Vonderviszt F. (szerk.): Műszaki Kémiai Napok konferenciakiadvány 2016 Veszprém ISBN 978-963-396-087-5 pp.70-76.
- [S5] **József Nádas**, Vilmos Rakovics, István Réti, Csaba Dücső, Gábor Battistig: Spatially and spectrally stable semiconductor light sources for near infrared spectroscopy in: Materials Today: Proceedings vol.4.(7/2) (2017) pp.7107-7113. DOI:10.1016/j.matpr.2017.08.004
- [S6] **Nádas József**, Rakovics Vilmos: »Fehér« LED a közeli infravörös tartományban, in: Fizikai Szemle (2017/1) LXVII. évf. 745. szám pp.2-6.; HUISSN: 0015-3257
- [S7] **József Nádas**, Vilmos Rakovics: Bandwidth widening of semiconductors with luminescent layer in: Dariusz Sawicki, Piotr Pracki (szerk.) IEEE Xplore Digital Library 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4) Karpacz, 2016. pp. 1-4.; ISSN 2214-7853; DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745519
- [S8] Vilmos Rakovics, **József Nádas**, István Réti, Csaba Dücső, Gábor Battistig: Growth and characterization of broad spectrum infrared emitting GaInAsP/InP heterostructures, in: Journal of Crystal Growth vol.462 (2017) pp.572-575. ISSN 0022-0248; Ref.: CRY23851; DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.11.123

- [S9] **József Nádas**, Vimos Rakovics, István Réti: Possibility of bandwidth-widening with luminescent layer in LED structures - Bandwidth widening in NIR LEDs and opportunities in visible range, in: Proceedings of the Lux Europa 2017 IEEE [editor Matej B. Kobav]. - Lighting Engineering Society of Slovenia, 2017. ISBN 978-961-93733-4-7 pp.669-674.
- [S10] László Balázs, **József Nádas**: Color quality of hybrid LED systems, in: Proceedings of the VII. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4, ISBN 978-1-5386-7923-4 (2018), pp.71-74.
- [S11] **József Nádas**, László Balázs: Characterization of hybrid LED panels, in: Proceedings of the VII. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4, ISBN 978-1-5386-7923-4 (2018), pp.81-83.
- [S12] Vimos Rakovics, **József Nádas**, István Réti, Csaba Dücső and Gábor Battistig: Broad spectrum InGaAsP/InP near infrared emitting device, in: HETECH 2014, 23rd European Workshop on Heterostructure Technology - HETECH 2014, 12-15 October, Justus Liebig University Giessen, Germany.
- [S13] **József Nádas**, Vimos Rakovics: Research and spectroscopic application of GaInAsP/InP LEDs in the near-infrared range – Light absorption and reemission in a single broadband LED chip structure in: György Molnár, Tibor Würhl: KVK PhD Workshop Óbudai Egyetem, KVK (2023)



## 7. Egyéb világítástechnikai szakmai publikációim

- [E1] **Nádas J.:** Fény-Szín-Tér, in:Pintér Árpád (szerk.): Világítástechnikai évkönyv 2008-2009. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2009. pp. 92-96. ISSN 1416-1079"
- [E2] **Nádas J.:** Fényben fürdő élményfürdők, in: Kovácsné Jáni K. (szerk.): Világítástechnikai évkönyv 2010-2011. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2010. pp. 81-87. ISSN 1416-1079
- [E3] **Nádas J.:** Mi tudható a polarizált fényről és gyógyhatásáról? in: Barkóczi Gergely; Bolváry Gábor; Szabó Ferenc (szerk.): Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013: A fény és élettani hatásai. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 2012. pp. 80-95. ISSN 1416-1079"
- [E4] **Nádas J.:** Példák az innovatív világításra in: Molnár Károly Zsolt (szerk.): Innovatív világítás. 357 p. Budapest: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2013. pp. 284-357.
- [E5] **Nádas J.:** Retrofit LED-ek kiválasztási szempontjai, Villanszerelők Lapja ISSN 1588-8770, 143. szám, (XV. évf./12.) 2016/12. pp22-25.
- [E6] Novothny F., **Nádas J.:** LED és az áramütés elleni védelem, Elektrotechnika HU ISSN 0367-0708, 110. évf. 2017.03-04. pp. 37-39.
- [E7] Molnár Károly Zsolt, **Nádas J.**, Jakab Sándor, Varga Zoltán: Nem mind lámpa, ami fénylik, Villanszerelők Lapja ISSN 1588-8770, 146. szám, (XVI. évf./03.) 2017/03. pp...10-13
- [E8] Molnár K.Zs. **Nádas J.:** Egy lámpa fénye nem világít rá annak minden tulajdonságára, Elektrotechnika HU ISSN 0367-0708, 2017.03-04. pp. 34-36.
- [E9] K. Zs. Molnár, R. R. Szabó, **J. Nádas:** Lighting Culture, ProLighting for modern society [Elektronski vir]: proceedings of the Lux Europa 2017 / European Lighting Conference, September 18 - 20, 2017, Ljubljana, Slovenia; [editor Matej B. Kobav] - Lighting Engineering Society of Slovenia, 2017. ISBN 978-961-93733-4-7 pp.453-457

- [E10] Molnár K. Zs., Szabó R. R., **Nádas J.**: Világítási kultúránk, Világítástechnikai Évkönyv 2016-17, ISSN 1416-1079, Világítástechnikai Társaság, 2017, Budapest, pp.210-216.
- [E11] Erbeszkorn L., **Nádas J.**: A Világítástechnikai Állomás hagyatéka: az üvegdió állomány és annak digitalizálása, Világítástechnikai Évkönyv 2016-17, ISSN 1416-1079, Világítástechnikai Társaság, 2017, Budapest, pp.237-246.
- [E12] Balázs L., **Nádas J.**, Molnár K. Zs.: Fehér LED fényforrások színminősége; XXXIII. Kandó Konferencia, Óbudai Egyetem, Budapest, 2017. november 23.
- [E13] **Nádas J.**: A fényerő sötét oldala, Villanyszerelők Lapja, ISSN 1588-8770, 154. szám, (XVII. évf./1.) 2018/jan-febr.. pp.2-4
- [E14] **Nádas J.**: Filament LED-ek normálizzók helyett, Villanyszerelők Lapja, ISSN 1588-8770, 154. szám, (XVII. évf./9.) 2018/szept. pp.2-4.
- [E15] **Nádas J.**: LED szálalámpák, in: N. Vidovszky Á. - Poppe A. (szerk.): Világítástechnikai Évkönyv 2018-19, (MEE Világítástechnikai Társaság, 2019, Budapest, ISSN:1416-1079) pp. 112-117.
- [E16] Balázs L., **Nádas J.**: Hibrid LED rendszerek színvisszaadása, in: N. Vidovszky Á. - Poppe A. (szerk.): Világítástechnikai Évkönyv 2018-19, (MEE Világítástechnikai Társaság, 2019, Budapest, ISSN:1416-1079) pp. 94-100.
- [E17] **Nádas J.**, Gröller Gy.: Életciklus szemlélet a világítás környezeti értékelésében in: Nádas J. (szerk): XI. LED Konferencia: Fenntarthatóság és környezettudatosság a világítástechnikában. Konferenciakötet. XI. LED Konferencia, Óbudai Egyetem, Budapest, 2020.02.05-06. p47.
- [E18] L. Balázs, **J. Nádas**: Spatial distribution of photon flux density created by LED grow lights, IEEE CANDO-EPE-2020 Conference, 18-19 Nov. 2020, Budapest
- [E19] **Nádas J.**: Világítástechnika; in: Novothny Ferenc (szerk.) Elektromosipari szakemberek kézikönyve pp 107-196. (Edinfo Rendszerintegrátor Kft., Budapest, 2020 ISBN: 9786150093031)

- [E20] L. Balázs, **J. Nádas**, Zs. Molnár, Sz. Kál, T. Páva, Z. Sejpes: Optimizing photosynthetic photon flux density; In: Náday L. (szerk.): 2021 IEEE 4rd International Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), November 17-18. 2021, Budapest"
- [E21] L. Balázs, **J. Nádas**, T. Páva, Z. Sejpes: What is the proper measure of uniformity in lighting installations? In: Temesvári Zsolt (szerk.): XXXVII. Kandó Konferencia Konferencia, Budapest, 2021.11.18-19. Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, (2021)"
- [E22] **Nádas J.**, Gombár K.: Közvilágítási lámpatestek avulása I-II.; in: Villanyszerelők lapja ISSN 1787-1999.; XX.évf. 12. sz. 2021/12 pp 24-29..
- [E23] **Nádas J.**, Gombár K.: Lámpatestek felújítása; in: Villanyszerelők lapja ISSN 1787-1999.; XXI.évf. 1-2. sz. 2022/01 pp 14-19.
- [E24] L. Balázs, **J. Nádas**, M. Majoros, E.a Tunyogi, R. Csamangó, T. Sándor: Energy saving potential of adaptive street lighting, in: IEEE 5th International Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE 2022) pp.163-166.; IEEE Budapest 2022; ISBN: 9798350346190
- [E25] **Nádas J.**, Molnár Gy.: Zebravilágítás a gyakorlatban, in: Urbin Á., Hegedüs J. (szerk.): Világítástechnikai Évkönyv 2022-2023: Változások fényében, Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, pp 35-46 (2023)
- [E26] L. Balázs, **J. Nádas**, Zs. Molnár, T. Páva, Z. Sejpes: Optimization of Spatial Photon Irradiance Distribution for Indoor Vertical Farms, in: PROCEEDINGS 14th European Lighting Conference LUX EUROPA 2022 Česká společnost pro osvětlování, z.s., 2022. pp.265-270.

