

# »FEHÉR« LED A KÖZELI INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYBAN

Nádas József – Óbudai Egyetem, Kandó Villamossági Kar, Mikroelektronikai és Technológia Intézet  
Rakovics Vilmos – MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

## LED-ek a világítástechnikában

A világítástechnika napjainkban forradalmi változáson megy keresztül, a LED-ek egyre inkább kiszorítják a korábbi fényforrásokat. Egyrészt a lámpatestekben használt izzólámpák, fénycsövek és kompakt fénycsövek helyett alkalmazott úgynevezett retrofit LED fényforrások formájában, másrészt olyan LED világítótestekben, amelyekbe a gyártó a világító berendezés teljes élettartamára tervezett (és kicserélhetetlen) LED fényforrást épít.

Az emberi látás a 380–780 nm hullámhosszúság tartományban érzékeli a fényt. Érzékelésünk hullámhosszfüggő, azaz nem minden hullámhosszra azonos érzékenységgel az emberi szem, ám ebben a tartományban folyamatos. A hőmérsékleti sugárzó izzólámpák folytonos színképű sugárzása illeszkedik ehhez, a kompakt fénycsövek és fénycsövek esetén pedig a higany UV-sugárzását többféle (általában vörös, zöldes és kékes színárnyalatú) fénnyel átalakítva több-kevesebb hiányossággal fedi le a sugárzás a látható tartományt.

A LED-ek esetén az alapvető probléma, hogy nagyon keskeny tartományban sugároznak, egy LED önmagában mindig határozottan színes fényérzetet ad. A LED keskeny sugárzási sávja miatt világítástechnikai célokra a sávszélesítés mindenképpen szükséges, de ennek számos módját használják a gyártók, például:

- RGB LED 3 chip, vörös+zöld+kék chip egy tokban szerelve (1. ábra);

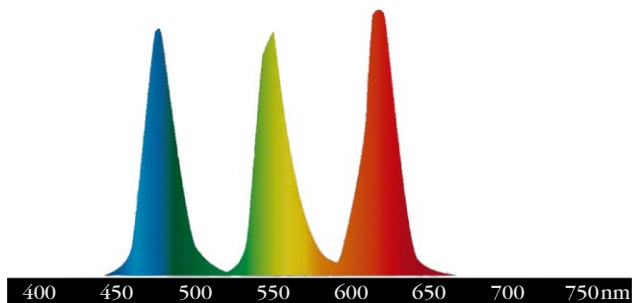
A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén (2016. augusztus 24–27.) bemutatott poszter alapján készült.



Nádas József, mérnök, villamosmérnök, világítástechnikai szakmérnök, az Óbudai Egyetem Kandó Villamosmérnöki Karának oktatója. Kutatási területe a közeli infravörös tartományban sugárzó vegyület-félvezető anyagok és eszközök.



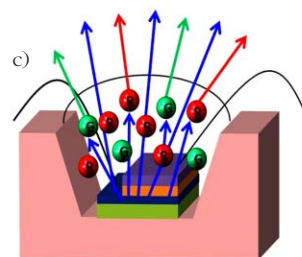
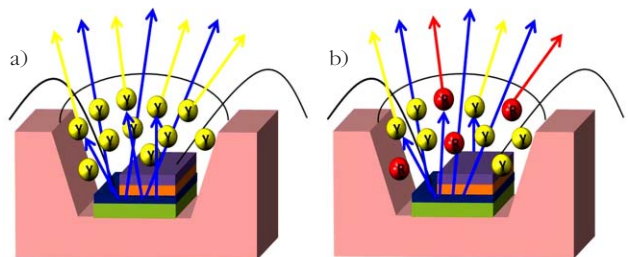
Rakovics Vilmos, vegyész, az anyagtudományok és technológiák kandidátusa, az MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet kutatója, tudományos főmunkatárs. Kutatási területe a vegyület-félvezető anyagok és eszközök technológiája, az egykristályos vékonyrétegek növesztése folyadékfázisból, valamint a napelemek, infravörös diódák, lézerek és detektorok.

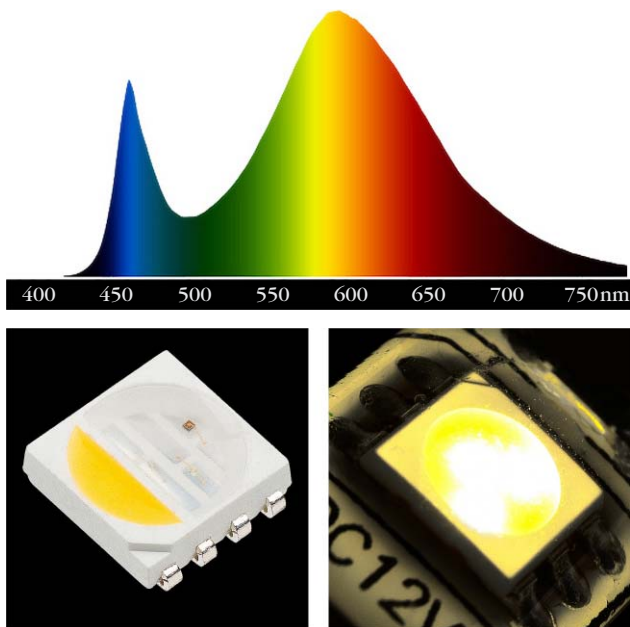


1. ábra. A kék, zöld, vörös (RGB) LED-ek közvetlenül sugároznak.

- RGB LED 1 chip, vörös+zöld+kék félvezetők egy hordozóra egymás mellé növesztve;
- kék LED sárga fénnyel (2.a és 3. ábra);
- kék LED sárga és vörös fénnyel (2.b ábra);
- kék LED zöld és vörös fénnyel (2.c ábra);
- kék LED sárga fénnyel és InGaAlP vörös színű LED.

2. ábra. A látható tartományban világító LED-ek fénnyel sávszélesítésére három leggyakoribb megoldás: (a) kék LED + sárga fénnyel, (b) kék LED + sárga fénnyel + vörös fénnyel, (c) kék LED + zöld fénnyel + vörös fénnyel [1].





3. ábra. A kék LED fénye részben változatlanul áthalad a sárga fényporrétegen, részben elnyelődik benne, gerjeszti azt és sárga fény formájában távozik.

A fényporos LED-ek szembevetően eltérnek még abban, hogy a fénypor a tokot kitöltve kerül felvitelre a LED felszínére, vagy a LED körül egy búra-szerű hordozón helyezkedik el (ez utóbbit közismerten „remote phosphor”-nak hívják).

Fehér fényt ma túlnyomó többségben két módon állítunk elő LED-ek segítségével: a dekorációs célú fényforrások (például LED szalagok) esetén RGB LED-del, a világítási célokra szánt LED-ek esetében pedig kék LED és sárga fénypor alkalmazásával.

Az RGB LED-ek három alapszínű fény additív keverésével működnek, amely így fehér érzetet okoz. A színvisszaadása nagyon rossz, mert az egyes diódák sugárzási tartománya nagyon keskeny (fizikailag adott) és a széles látható tartomány (380–780 nm) nagyon kis részét fedi le. A fényhasznosítása (hatásfoka) szintén viszonylag alacsony, mert az e célra széles körben használt vegyület-félvezetők nem optimálisak a magas fényhasznosítás elérésére, illetve a zöld a látási érzékenységünk maximuma környékén sugároz, ezért a fehér színérzet eléréséhez „visszafogottan” üzemel. Üzemeltetése problémás, mert a három dióda munkapontját külön-külön kell beállítani, ez külön meghajtó áramköröket igényel, és a változatlan korrelált színhőmérséklet tartásához az egyes diódák eltérő öregedésével párhuzamosan folyamatosan korrigálni szükséges.

A kék LED sárga fényporral a napjainkban leggyakrabban használt megoldás. A kék és sárga komplexen színű fény additív keverése fehér érzetet okoz. A színvisszaadás és a színhőmérséklet nagyrészt a sárga fénypor összetételén és mennyiségén múlik. Kevesebb fénypor esetén több kék összetevőt tartalmaz a fény, színhőmérséklete hidegebbé (kékesebbé) válik, ugyanakkor a fénypor által kibocsátott sárga fény kevesebb lesz, a sárga tartomány a gyakorlatban

keskenyebbnek is látszik. Mindez gyengébb színvisszaadást eredményez, a kevesebb hullámhossz-átalakítás miatt viszont kissé nő a fényhasznosítás. Röviden: hidegebb, rosszabb fényminőségű, de jobb hatásfokú fényforrást kapunk. Több fénypor esetén sárgás összetevők mennyisége nő, a színhőmérséklet melegebbé válik, színvisszaadás javul, a hatásfok azonban romlik. Ugyanazon LED ugyanazzal a fényporral, annak mennyiségétől függően lehet minőségi fehér fényt sugárzó kisebb hatásfokú, vagy rosszabb spektrális eloszlású és jobb hatásfokú eszköz. A fénypor és a hordozó, amelybe beágyazták, viszont így is, úgy is számottevő veszteséget okoz. A LED pontszerűsége több nagyságrenddel csökken, az egyebekben korszerűnek tekinthető COB (Chips On Board) LED-ekben pénzérme nagyságúra nő a sugárzó felület. A fénypor a LED-del termikus kontaktusban van, öregedésére a hőmérséklet is hat. A remote phosphor típusú LED-ekben ilyen közvetlen termikus kontaktus nincs, de a fényport hordozó szerkezet további veszteségeket okoz.

A kék fény részleges átalakításából eredő fizikai és anyagszerkezeti veszteségek ellenére is a kék LED – sárga fénypor megoldással készülnek napjaink legjobb fényhasznosítású világítási célú LED fényforrásai. A fényhasznosítás azonban nem emelhető minden határon túl. A fénykibocsátó diódák hordozóit, rétegszerkezetének anyagait, növesztési technológiáját folyamatosan fejlesztik, miközben a fényporréteg egy viszonylag állandó része e LED-eknek. Az energiamegtakarítási igény (különösen EU-ban) a következő évtized elejére olyan fényhasznosítási követelményeket támaszt a LED fényforrásokkal szemben, amelyet csak a fényporok lényeges korszerűsítésével, vagy olyan technológiákkal lehet megvalósítani, amelyek a LED-ek újszerű szerkezeti felépítésének köszönhetően részben vagy egészben elhagyhatóvá teszik a fénypor alkalmazását. Az erre irányuló kísérletek eddig nem hoztak áttörést, csak kisebb mértékben szélesítették a sugárzási tartományt, például kék sugárzást kék-kékeszöld tartományba.

## LED-ek az infravörös spektroszkópiában

A közeli infravörös tartományt (near infrared, NIR) spektroszkópiai célokra, szerves anyagok vizsgálatára lehet használni. Ezekben az -OH, -NH, -CH csoportokat lehet kimutatni, a kötések vegyértékregéseire jellemző rezonancia-hullámhossz elnyelésének mérésével.

Egyik módszer, hogy e csoportokban a vegyérték-kötés 1–3. felharmonikus-tartományában mérünk, ebben a hullámhossztartományban ugyan kisebb a jel, mint az alapharmonikuson, de jobb a jel-zaj arány és „mélyebbre” látni a mintában. Ez a közeli infravörös tartomány, amely 1100–1800 nm-ig terjed. A LED-ek megjelenése előtt a mérésekhez izzólámpát használtak. A mérés hullámhossztartományában az izzó üzemeltetéséhez szükséges energiához képest a haszno-

sított sugárzás energiája nagyon kicsi, a hatásfok nagyon rossz. A LED hullámhossztartománya keskeny és tervezhető, valamint számos további előnye van az izzókhöz képest: rövid, néhány  $10^{-9}$  s válaszidejű, geometriája pontoszerű, jól fókuszálható, kis fogyasztású, várható élettartama az izzólámpáénak többszöröse [2]. Széles sávú és hangolható LED-ekkel ez a mérés hatékonyabbá és pontosabbá tehető.

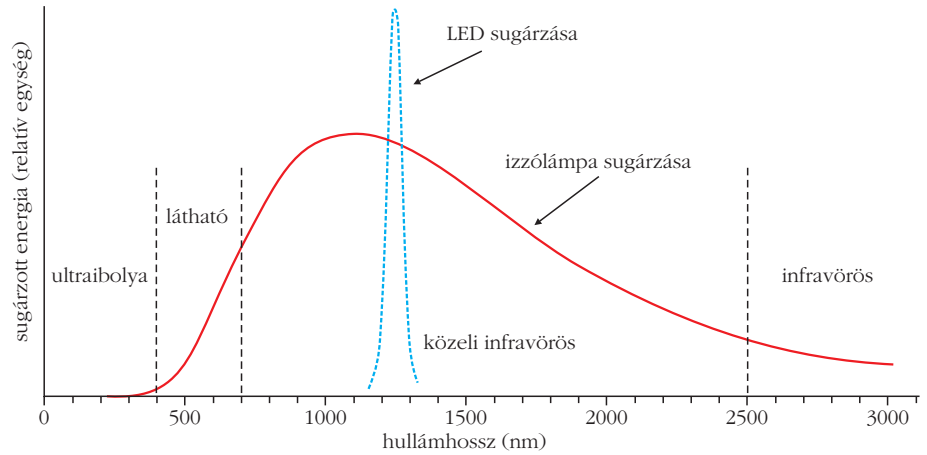
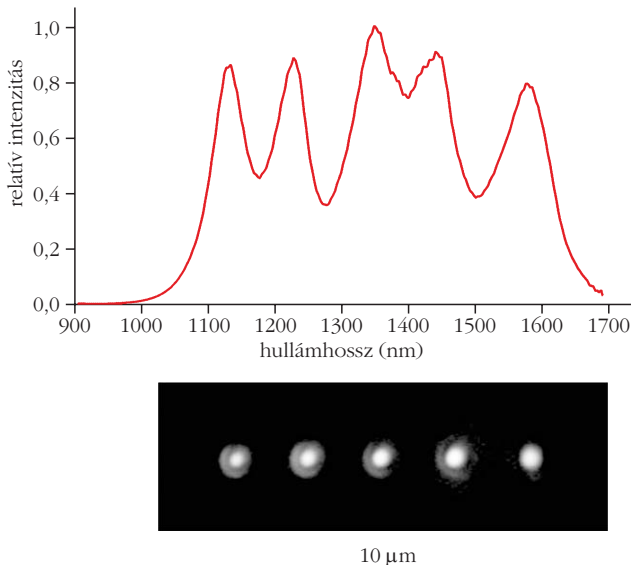
A LED egyik legnagyobb előnye – a keskeny sugárzási sáv – a legnagyobb hátránya is egyben (4. ábra). A probléma hasonló, mint a látható tartományban a világításra használt LED-ek esetében: egyetlen LED hullámhossz-féltékszélessége keskeny a mérés kivitelezéséhez, ezért jó hatásfokú és tervezhető hullámhossz-tartományú sávszélesítésre van szükség.

A mérés technikai alkalmazás miatt további követelmény az üzemeltetés egyszerűsége, az alacsony hőmérsékletfüggés, a mérés nagyon kis méreteihez viszonyított pontosság. Tehát magasabbak az elvárások.

A több hullámhosszúságon sugárzó LED megvalósítására ideálist közelítő megoldások már léteznek, például a tandem-LED vagy a kvantum-LED. A kompakt felépítés ellenére ezeken eltérő hullámhosszúságú sugárzást kibocsátó aktív rétegek működnek, amelyek elektromos és hőtechnikai paraméterei ideálisan nem állíthatók be, ezek (jellemzően két-három hullámhosszra) működőképes, de kompromisszumos megoldások.

Egy adott anyag a kimutatásához, vagy a koncentrációméréséhez legalább két-három eltérő hullám-

5. ábra. Az MFA-ban készült közös hordozóra növesztett LED-array működés közben (infravörös felvétel) és a mért spektruma.



4. ábra. Izzólámpa ( $T = 3000$  K) és LED ( $\lambda_k = 1250$  nm) jellemző sugárzási spektruma.

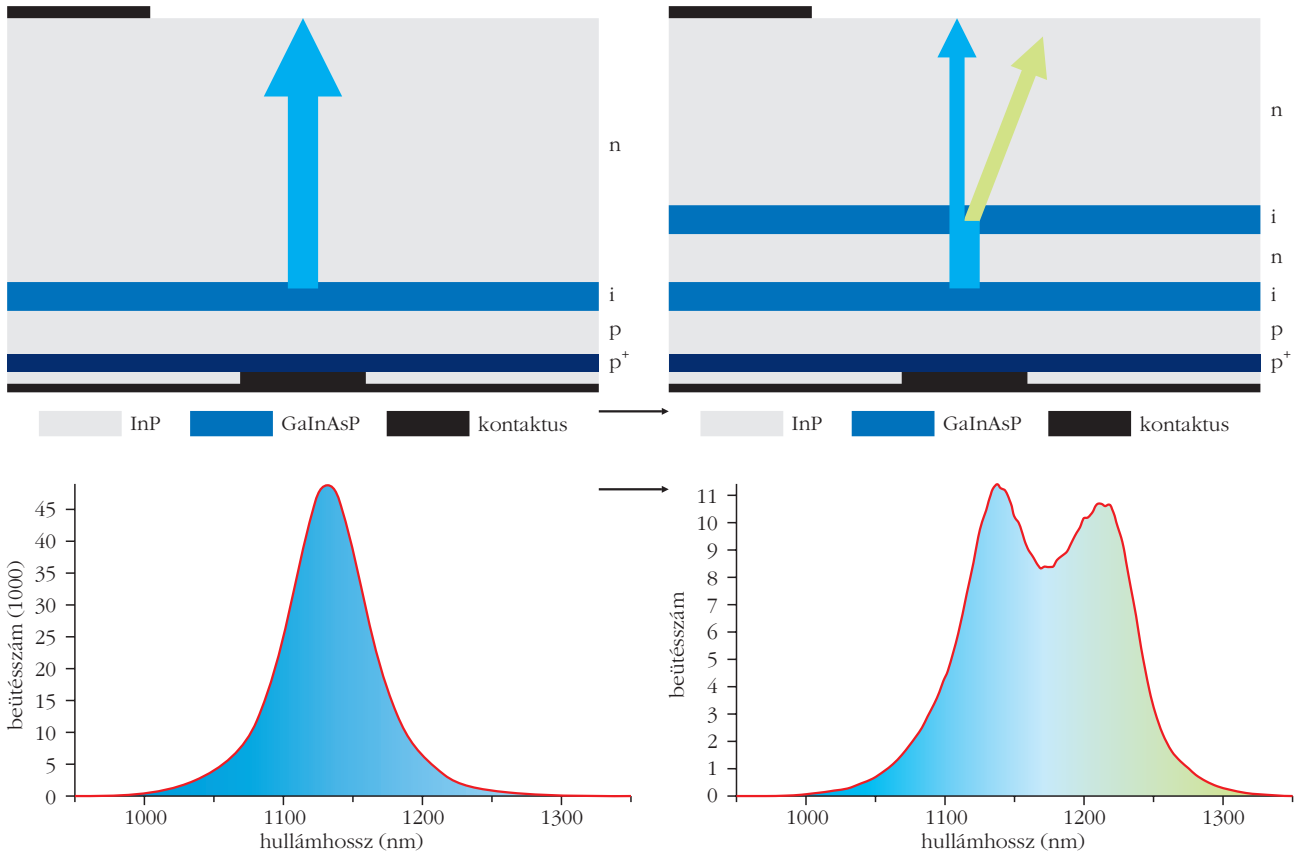
hosszon kell mérni. A jelenlegi gyakorlatban ezt több (jellemzően három) különböző hullámhosszúságú egyedi LED üzemeltetésével valósítják meg. A megoldás hátránya, hogy a sugárforrás nem teljesen pontoszerű, leképezési hibák keletkeznek, jelentős lesz a spektrum irányfüggése, valamint különböző hullámhosszon sugárzó LED-ek hőmérsékletfüggő paraméterei és öregedése különböző.

A külön tokozott LED-ek helyett az egy hordozóra épített, de különböző hullámhosszúságon sugárzó önálló diódaként növesztett, úgynevezett LED-array szerkezetek a leginkább pontoszerűek. Ilyen LED-eket mi is készítettünk és mértünk (5. ábra). A LED-array lényegesen kisebb és pontoszerűbb, mint az egy tokba épített 3 független dióda, de mérés technikai feladatokhoz igényelt pontosság elérése hasonló nehézségekbe ütközik, mint a világítástechnikai célú RGB LED-ek esetén: geometriai leképezési hibák, nehéz elektromos és hőtechnikai stabilitás, eltérő öregedés.

Az ideális sugárforrás egyetlen félvezető szerkezet, amely a méréshez szükséges tartományban széles sávban sugároz és hőmérsékletfüggése minimális. Ez esetben minden hullámhosszon egy-egy független aktív réteg sugározna, amely legjobb hatásfokra méretezve a legkisebb nyitófeszültségen működne, de ebből következően több LED-hez több meghajtó áramkör is szükséges lenne, amely további üzemeltetési nehézségeket okoz.

## Sávszélesítés lumineszkáló réteggel

Egyik megoldás a LED aktív rétege mellé az azonos anyagrendszerben növesztett, de kissé eltérő összetételű lumineszkáló réteg. Az elsődleges rétegben keletkező sugárzás csak részben lép ki változatlan formában a diódából, egy része további réteget gerjeszt (már nem elektromosan, hanem a fény mint elektromágneses sugárzás által), amely anyagi összetételének megfelelő hullámhosszon lumineszkálással sugároz (6. ábra). A lumineszkáló réteg pontosan ugyanazt a feladatot látja el, mint a fénypor, de a LED szerkezetébe integrálva. Az összetétel pontos beállításával



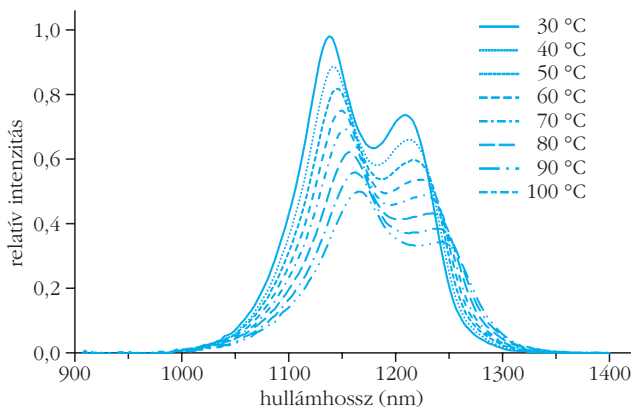
6. ábra. Sávzélesztés lumineszkáló réteggel.

pontosan hangolható a kívánt másodlagos sugárzás hullámhossza, a réteg vastagságával pedig a hullámhossz-átalakításra kerülő fény aránya. A LED a lumineszkálással így egyszerre több sugárzási csúcstól álló meg [6, 7].

A kísérlethez készült lumineszkáló LED-ek az MFA laboratóriumaiban folyadékfázisú epitaxiával készültek (LPE) GaInAsP/InP anyagrendszerben.

A lumineszkáló LED-ek alkalmasak széles hullámhossztartományban való mérési felhasználásra, ekkor a több hullámhosszon működő diódasoros érzékelőhöz elegendő egyetlen LED fényforrás alkalmazása. A két sugárzási csúccsal rendelkező LED esetén a hőmérséklet-változás hatására bekövetkező csúcsetolódások ha-

7. ábra. A két hullámhosszon, 1150–1220 nm-en sugárzó GaInAsP/InP LED sugárzása és hőmérsékletfüggése.

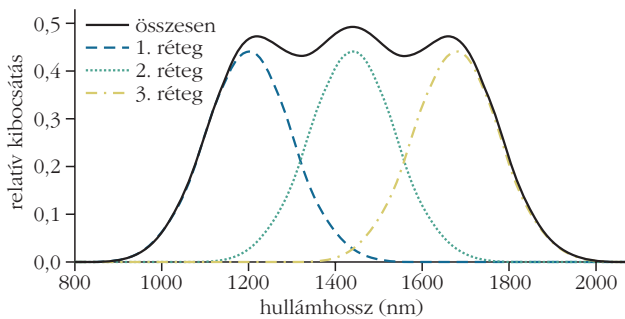
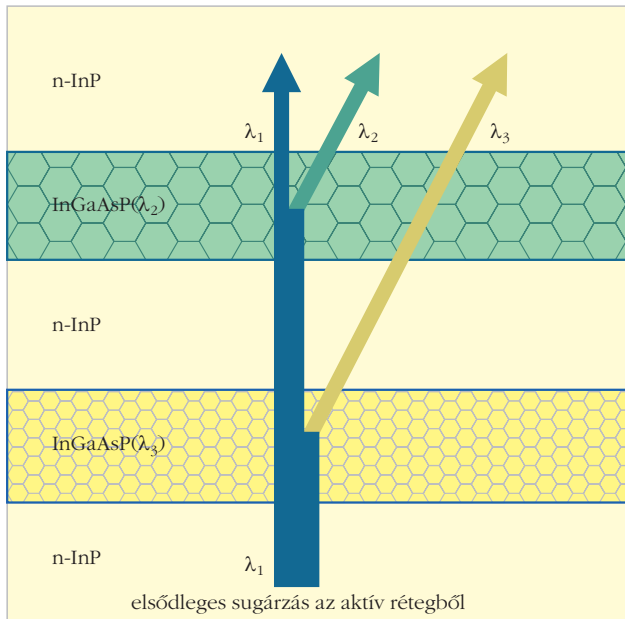


tásai összeadódnak. A két vagy több sugárzási hullámhossz miatt hőfokfüggésük egy-egy szakaszon közel konstans, illetve több szakaszon azonos irányú lineáris. Ennek köszönhetően másik lehetséges alkalmazási terület a kis hőfokfüggésű felhasználási igények kielégítése (7. ábra), különösen például kéziműszeres mérésekhez, amelyekben az egyszerűség miatt bonyolult áramköri korrekció, illetve a kis teljesítményfelvétel miatt termostálás nem valósítható meg.

Több lumineszkáló sáv alkalmazásával összetett rétegszerkezet alakul ki. Az így elkészített lumineszkáló rétegszerkezetet hullámhosszkonverternek nevezzük, amely egy vagy több abszorpciós rétegből és egy vagy több emissziós rétegből áll. A rétegszerkezetben ezek felváltva követik egymást. Az ilyen hullámhosszkonverter teljes vastagsága határozza meg az abszorpció nagyságát. Az egyes hullámhosszakhoz tartozó emisszió nagyságát az emissziós rétegekbe vándorolt töltéshordozók mennyisége határozza meg, tehát a töltéshordozó szabad úthosszán belüli szomszédos abszorpciós rétegek vastagsága. Ha egy abszorpciós réteg két emissziós réteggel is határos, akkor az adott rétegben elnyelt sugárzás a két emissziós rétegben megosztva konvertál új hullámhosszszakra (8. ábra).

A lumineszkáló LED hullámhossz-átalakítási hatásfokának számítása során a két hullámhosszon sugárzó LED transzmissziós és emissziós spektrumának mérése egynél nagyobb konverziós értéket mutatott, amely a konverziós réteg transzmissziójának a nö-





8. ábra. Három hullámhosszon sugárzó LED lumineszkáló rétegszerkezetének elvi felépítése és a sugárzási tartományok összeadódásának elve.

vesztett és mért transzmisszióhoz korrigálásával a mért értéknél is nagyobb arányt kaptunk, az ebből számítható hatásfok 90% feletti.

## Összegzés

Összességében minden korábbinál több előnyt nyújt az egy chipes lumineszkáló rétegekkel felépített megoldás. Az egyetlen aktív réteg munkapontja könnyen beállítható. Lumineszkáló réteg alkalmazásával az el-

sődleges rétegben keletkező sugárzás csak részben lép ki változatlan formában a diódából, egy része a további rétegeket gerjeszti és lumineszkálással több sugárzási csúcstól valósít meg. Egy szerkezetben több lumineszkáló réteg is növeszthető, amelyek egymással is kölcsönhatásban állnak.

Az általunk növesztett LED egyetlen félvezető-szerkezet, amely a méréshez szükséges tartományban széles sávban sugároz és hőmérsékletfüggése minimális. Az aktív és a lumineszkáló réteg hullámhossza az anyagösszetétellel, az amplitúdó a rétegvastagsággal hangolható. Ennek köszönhetően tág határok közt növeszthető jó hatásfokú, pontosan a kívánt hullámhosszakra hangolt és közel hőmérséklet-független LED.

A működési elv sávszélesítés céljából más anyag-rendszerekben, így a látható tartományban is felhasználható. A széles látható tartomány és a nagyobb rács-állandó-különbségek miatt 2-3 réteggel részleges eredmények, esetleg a fénypor részleges kiváltása várható.

## Irodalom

1. Rakovics V., Réti I.: Infravörös diódák alkalmazása az élelmiszerek spektroszkópiai vizsgálatára. *Műszaki Kémiai Napok '08*, 2008. április 22–24. Veszprém, 64–68.
2. Zarr, R.: LEDs Line up to Replace Residential Incandescent Bulbs. *Electronic Design* (2013/02) 14–15.
3. Réti I., Ürmös A., Nádás J., Rakovics V.: Nanostruktúrák LED-ek *Elektrotechnika* 11 (2014) 19–23.
4. E. Kupal: Phase Diagrams of InGaAsP, InGaAs and InP Lattice-Matched to (100)InP. *Journal of Crystal Growth* 67(1984) 441–457.
5. Rakovics V., Nádás J., Réti I., Dücső Cs., Battistig G.: Broad spectrum GaInAsP/InP near infrared emitting device. *Poster in section TOPS the 23rd HETECH 2014 Conference* 12–15. 10. 2014. Justus Liebig University Giessen, Germany.
6. Rakovics V.: Optical investigation of InGaAsP/InP double heterostructure wafers. *Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, 2010 International Conference on, Sevastopol, Ukraine, 2010. 09. 10–14. *IEEE Communications* (2010) 216–218.
7. Rakovics V., Balázs J., Réti I., Püspöki S., Lábadi Z.: Near-Infrared Transmission Measurements on InGaAsP/InP LED Wafers. *Physica Status Solidi C Conferences and Critical Reviews* 00:(3) (2003) 956–960.
8. Rakovics V., Püspöki S., Balázs J., Réti I., Frigeri C.: Spectral characteristics of InP/InGaAsP Infrared Emitting Diodes grown by LPE. *Materials Science and Engineering B – Solid State Materials for Advanced Technology* 91–92 (2002) 491–494.
9. Rakovics V., Balázs J., Püspöki S., Frigeri C.: Influence of LPE growth conditions on the electroluminescence properties of InP/InGaAs(P) infrared emitting diodes. *Materials Science and Engineering B – Solid State Materials for Advanced Technology* 80/1–3 (2001) 18–22.



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY  
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!  
Adószámunk: 19815644-2-41**