

# Nanostrukturált határfelületek optikai tulajdonságainak vizsgálata

Tézisfüzet

Sepsi Örs

Témavezető: Koppa Pál

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Atomfizika Tanszék

(2017)



# 1. A kutatás előzménye

A modern optoelektronikai eszközökben – pl. napelemek, fénykibocsátó diódák – a fény egy, vagy több határfelületen halad keresztül terjedés közben. Ezek a határfelületeken gyakran nanométeres mérettartományba eső struktúrák találhatók. Ilyen multiréteg struktúrák esetén a bejövő elektromágneses sugárzás áteresztődik, visszaverődik, elnyelődik, vagy szóródik; továbbá hullámvezető és plazmonikus módusok is gerjeszthetők. Ezen határfelületek optimalizálásával az aktuális alkalmazáshoz megfelelő, jobb tulajdonságú eszközök valósíthatók meg. Elérhető többek között napelemek hatásfokának növelése, plazmonikus eszközökben megjelenő nagyobb térerősítés, tervezett permittivitású metaanyagok készítése, kontrollált fénykibocsátás nanopöttyök esetén stb.

A dolgozatomban két különböző alkalmazást vizsgálok, ahol mindkettőben jelentős szerepet kapnak a nanostrukturált határfelületek.

Disszertációm első felében polarizált fénykibocsátó diódák (LEDek) megvalósításával foglalkozom. A standard LED által kibocsátott sugárzás polarizálatlan, viszont polarizált LED igen hasznos lenne számos alkalmazás szempontjából, pl. nagykontrasztú leképezés [Ramella-Roman et al. (2003); Baba et al. (2005)], optikai kommunikáció [Otte et al. (1999)] vagy LCD háttérvilágítás [Yeh and Gu (2009)]. Több tudományos közlemény foglalkozik polarizált fénykibocsátó dióda megvalósításával. Schubert és társai két lehetséges megoldást mutattak be a probléma megoldásaként: egy a Brewster szögön alapuló polarizáció-szelektív tokozást polarizálatlan fehér fényforrásra, [Schubert et al. (2007b)] valamint egy polarizáció-erősítő reflektort részlegesen polarizált GaInN LED-ek esetén [Schubert

et al. (2007a)]. Azonban ezek az alkalmazások vagy túl specifikusak egy bizonyos fénykibocsátó elrendezéshez, vagy nem túl hatékonyak.

Két lehetséges megoldást javaslok LED-ekből történő polarizált fény kicsatolására. Elsőként ellipszoid alakú fém nanorészecskékből készült rács tulajdonságait vizsgálom a chip-tokozás határfelületen. Másodszor fémrács polarizátorokat alkalmazok különböző határfelületek esetén. Végül a fémrács polarizátort egy komplett LED modellel együtt vizsgálom, hogy a teljes rendszer működését tanulmányozzam.

Disszertációm második felében fém nanoüreg és nanodomb rácsok hullámhossz függő módusszerkezetét vizsgálom. Ilyen rétegek nagy előnye, hogy a struktúra periodikus szerkezete miatt a beeső hullám lokalizált és delokalizált felületi plazmon módusokat tud gerjeszteni [Cole et al. (2007)]. Míg a lokalizált módusok az aranyréteg lokális felületi struktúrájához kapcsolódnak (dombok, üregek), a delokalizált módusok kiterjednek a felület mentén.

Habár ilyen felületek módusszerkezetének elméleti leírása már létezik [Sugawara et al. (2006); Kelf et al. (2006)], a modell alkalmazása nagy felületű struktúrákra nem kielégítő. Munkám során Langmuir-Blodgett technikával készült kísérleti mintákat vizsgáltam és megmutattam, hogy a mért reflektancia spektrumok magyarázhatók egy egyedi elektromágneses modellel, mely a struktúra doménes szerkezetét figyelembe veszi.

## 2. Célkitűzések

A munkám célja, hogy megértsem azokat a legfontosabb tényezőket, amelyek befolyásolják az elektromágneses hullámok ter-

jedését multiréteg rendszerben. Ezt a tapasztalatot nagy energiahatékonyságú és funkcionális eszközök fejlesztésére használok. Dolgozatom ilyen rendszerek elektromágneses modellezésére fókuszál, külön hangsúlyt fektetve a felületen elhelyezkedő nanorészecskék és felületi mintázatok hatására.

Az optikai rendszerek paramétereinek előzetes elméleti vizsgálatával a munka eredményei felhasználhatók modern optoelektronikai eszközök kísérleti megvalósítására és finomhangolására.

### 3. Elektromágneses modellek

A disszertációban használt elektromágneses modellek széles skálát ölelnek fel. Habár mindegyik modell a Maxwell egyenleteken alapul, az elméleti és numerikus implementáció az aktuális problémától függ. A disszertációban néhány esetben jól ismert módszereket használok: időtartománybeli véges differencia módszert (FDTD), csatolt hullám elméletet (RCWA) és geometriai optikai sugárátvezetést. Azonban ezen a módszerek használata sok esetben nehézkes a nagy számolási térfogat miatt, vagy a túl hosszú optimalizációs idő miatt.

Például abban az esetben, amikor 10 nm-es mérettartományú nanorészecskéket vizsgálunk multiréteg rendszerben, sokkal optimálisabb egy az aktuális problémához igazított módszert használni. Erre a problémára a dolgozatban a kevésbé ismert periodikus Green-tenzor módszert használok. A módszer használata jelentősen lecsökkenti a futási időt, valamint a számolási kapacitást, míg a számolás pontossága növekszik az érvényességi tartományon belül.

## 4. Új tudományos eredmények

1. Ellipszoid alakú ezüst nanorészecskékből készült periodikus struktúra alkalmazását javasoltam LED-ekben történő integrált polarizátorként való használatra. Elvégeztem a polarizáló nanorészecske-rács vizsgálatát és optimalizációját a periodikus rendszer Green tenzorának felhasználásával. Megmutattam, hogy 100 nm-es részecske-mérettel elérhető 50% polarizációs fok és 15%-nál kisebb abszorpció kollimálatlan és polarizálatlan dipólus sugárzás esetén. [I]
2. Bebizonyítottam, hogy integrált fémrács polarizátor segítségével megvalósítható polarizált fényemittáló dióda. Ehhez a geometriai optikai és a fizikai optikai modell kombinációját használtam: a teljes LED struktúrát sugárátvezetéssel modelleztem, a fémrács polarizátor hatását lokálisan csatolt hullám elmélettel vettem figyelembe. Megmutattam, hogy a fémrács polarizátor jobb eredményeket ad a nanoellipszoid rácsnál. Igazoltam, hogy alkalmasabb a nanostruktúrát a tokozásra helyezni a chip-felület helyett. Ebben az esetben az eszköz hatásfoka (12.6%) szignifikánsan magasabb volt mint egy polarizálatlan LED és egy külső polarizátor kombinációja (9.6%) gyakorlati alkalmazásokra megfelelő kioltási arány mellett (76.86). [II]
3. Magyarázatot adtam a Langmuir-Blodgett technikával készült kétdimenziós fém nanoüreg és nanodomb rácsok reflektancia spektrumára az időtartománybeli véges differencia módszer segítségével. A mintakészítésből fakadó

domén-szerű struktúrát a rácsirányokra történő inkoherens átlagolással vettem figyelembe. A számolt és mért reflektancia spektrumok kitűnő egyezést mutatnak mind a nanoüreg, mind a nanodomb struktúrára mindkét polarizációs gerjesztés mellett. A fejlesztett modell lehetőséget ad az aktuális struktúra plazmonikus tulajdonságainak megismerésére. [III]

## 5. Tudományos közleményeim listája

### 5.1. Tézispontokhoz kapcsolódó közlemények

- [I] Örs Sepsi, Tibor Gál, Pál Koppa, Polarized light emitting diodes using silver nanoellipsoids, OPTICS EXPRESS 22:(S4) pp. A1190-A1196. (2014)
- [II] Örs Sepsi, István Szanda, Pál Koppa, Investigation of polarized light emitting diodes with integrated wire grid polarizer, OPTICS EXPRESS 18:(14) pp. 14547-14552. (2010)
- [III] Örs Sepsi, Szilárd Pothorszky, Tuan Máté Nguyen, Dániel Zámbó, Ferenc Ujhelyi, Sándor Lenk, Pál Koppa, András Deák, Preparation and characterization of two-dimensional metallic nanoparticle and void films derived from a colloidal template layer, OPTICS EXPRESS 4:(2) pp. A424-A429. (2016)

### 5.2. Egyéb közlemények

1. Hild E, Deak A, Naszályi L, Sepsi O, Abraham N, Horvolgyi Z, Use of the optical admittance function and its

- WKB approximation to simulate and evaluate transmittance spectra of graded-index colloidal films, JOURNAL OF OPTICS A-PURE AND APPLIED OPTICS 9:(10) pp. 920-930. (2007)
2. Naszályi Nagy L, Ábrahám N, Sepsi Ö, Hild E, Cot D, Ayrál A, Hórvölgyi Z, Complex Langmuir-Blodgett films of SiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles with advantageous optical and photocatalytical properties, LANGMUIR 24:(21) pp. 12575-12580. (2008)
  3. Tibor Gál, Sepsi Örs, Paul Medwick, Andrew Wagner, Pal Koppa, Modeling the optical properties of nanocomposite media using effective transfer matrices, APPLIED OPTICS 53:(28) pp. 6598-6604. (2014)
  4. Örs Sepsi, Balázs Gombkötő, Zsolt Nagy, Pál Koppa, Timo Feid, Swen Frohmann, Susanna Orlic, Investigation of the spectral behaviour of microholographic gratings in photopolymers, In: SPIE Optics+Photonics. Place and date of conference: San Diego, United States of America, 10/08/2008-14/08/2008.p. 111.
  5. Örs Sepsi, István Szanda, Pál Koppa, Modeling polarized light emitting diodes with the use of metallic nanoslit array, In: Zadkov VN, Durt T (ed.), SPIE Photonics Europe: SPIE 7727. Place and date of conference: Brussels, Belgium, 12/04/2010-16/04/2010. Paper 7717-53. 1 p.
  6. Örs Sepsi, Tibor Gál, Pál Koppa, Investigation of polarized light emitting diodes, In: EuroNanoForum. Place and date of conference: Budapest, Hungary, 30/05/2011-01/06/2011. Paper 1.



7. Örs Sepsi, Tibor Gál, Pál Koppa, Polarized light extraction from light emitting diodes by means of metallic nanostructures, In: PhD Conference of the Doctoral School for Physics. Place and date of conference: Budapest, Hungary, 22/06/2012 Paper B11. (PhD Conference of the Doctoral School for Physics)
8. Gál Tibor, Sepsi Örs, Koppa Pál, Modeling the optical properties of nanostructured layers in multilayer stacks In: Anon (ed.), Proceedings of the PhD conference organized by the Doctoral School of Physics of the Faculty of Natural Sciences Budapest University of Technology and Economics. 71 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Hungary, 17/05/2013 Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2013. Paper Gal et al. (ISBN:978-963-313-083-4)
9. Gál Tibor, Sepsi Örs, Koppa Pál, Investigation of polarized light emitting diodes, International School of Atomic and molecular Spectroscopy, In: International School of Atomic and molecular Spectroscopy. Place and date of conference: Erice, Italy, 04/07/2013p. 1.
10. Beleznai Szabolcs, Sepsi Örs, Koppa Pál, Tóth Zoltán, Fényemittáló diódák, In: Ádám P, Almási G (ed.) Kvantumelektronika 2014: VII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről. Konferencia helye, ideje: Budapest, Hungary, 28/11/2014 Pécs: Pécsi Tudományegyetem, TTK Fizikai Intézet, 2014. Paper E8. 2 p. (ISBN:978-963-642-697-2)
11. Örs Sepsi, János Molnár, Sándor Lenk, Ferenc Ujhe-

lyi, Alfréd Menyhárd, Relation between the supermolecular structure and light scattering behavior in birefringent semicrystalline polymers, In: Electromagnetic and Light Scattering XV. Place and date of conference: Leipzig, Germany, 22/06/2015-26/06/2015. Paper ELS-XV-2015-97-1.

## Hivatkozások

- Baba, J. S., Gleason, S. S., Goddard, J. S., and Paulus, M. J. (2005). Application of polarization for optical motion-registered SPECT functional imaging of tumors in mice. In *Proc. SPIE*, volume 5702, pages 97–103.
- Cole, R. M., Baumberg, J. J., De Garcia Abajo, F. J., Mahajan, S., Abdelsalam, M., and Bartlett, P. N. (2007). Understanding plasmons in nanoscale voids. *Nano Lett.*, 7(7):2094–2100.
- Kelf, T. A., Sugawara, Y., Cole, R. M., Baumberg, J. J., Abdelsalam, M. E., Cintra, S., Mahajan, S., Russell, A. E., and Bartlett, P. N. (2006). Localized and delocalized plasmons in metallic nanovoids. *Phys. Rev. B*, 74(24):245415.
- Otte, R., de Jong, L. P., and van Roermund, A. H. M. (1999). *Low-Power Wireless Infrared Communications*. Springer US, Boston, MA.
- Ramella-Roman, J. C., Lee, K., Prahl, S. A., and Jacques, S. L. (2003). Polarized light imaging with a handheld camera. In *SPIE, Saratov Fall Meet. 2002 Opt. Technol. Biophys. Med. IV*, volume 5068, pages 284–293.
- Schubert, M. F., Chhajed, S., Kim, J. K., Schubert, E. F., and Cho, J. (2007a). Linearly polarized emission from GaInN lightemitting diodes with polarization-enhancing reflector. *Opt. Express*, 15(18):11213.
- Schubert, M. F., Noemaun, A., Chhajed, S., Kim, J. K., Schubert, E. F., and Sone, C. (2007b). Encapsulation shape with

- non-rotational symmetry designed for extraction of polarized light from unpolarized sources. *Opt. Express*, 15(16):10452.
- Sugawara, Y., Kelf, T. A., Baumberg, J. J., Abdelsalam, M. E., and Bartlett, P. N. (2006). Strong Coupling between Localized Plasmons and Organic Excitons in Metal Nanovoids. *Phys. Rev. Lett.*, 97(26):266808.
- Yeh, P. and Gu, C. (2009). *Optics of Liquid Crystal Displays*. Wiley Publishing, 2nd edition.