

LEPKESZÁRNYAK FOTONIKUS NANOARCHITEKTÚRÁINAK GÁZ- ÉS GŐZÉRZÉKELÉSI TULAJDONSÁGAI

Piszter Gábor, Kertész Krisztián, Vértesy Zofia, Biró László Péter
MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet¹

Bálint Zsolt
Magyar Természettudományi Múzeum, Lepkegyűjtemény²

Jakab Emma
MTA TTK Anyag- és Környezetkémiai Kutatóintézet³

Bizonyos rovarok csillogó színét a külső testfelszínüket képező kitin nanoszerkezete határozza meg. Így például a lepkék esetében gyakran a látható fény hullámhosszának nagyságrendjébe eső méretű nanoarchitektúra alakul ki a szárnyat borító pikkelyekben. Ez a szerkezet természetes fotonikus kristályként működik, és az általa visszavert fény hullámhosszát – az esetlegesen jelenlévő festékanyagokon kívül – a nanoarchitektúrát alkotó nanoszerkezetek jellemző méretei, illetve a pikkely anyagának és környezetének törésmutató-különbsége határozza meg. Ha a környezet törésmutatóját megváltoztatjuk, a pikkelyek fényvisszaverési spektrumában eltérést tapasztalunk. A jelenséget felhasználhatjuk optikai elvű szelektív gáz/gőzérzékelésre: a környező gőzök lecsapódnak a nanoszerkezetben, és spektrométerrel mérhető eltérést idéznek elő a visszavert fény színében. Az eltérés mértéke függ a gőz koncentrációjától. Cikkünkben erre összpontosítunk, bemutatva néhány gőzdetektálási mérésünket, amelyek nagy részét közel rokon boglárkalepkék kék szárnyain végeztünk. A kísérletek során az alkalmazások szempontjából nagyon fontos kémiai szelektivitást állapítottunk meg, valamint a jelenség hőmérséklettől való függését is megfigyeltük.

A boglárka-rokonúak nemzetségét képviselő lepkefajok többségének hímjei szerkezeti eredetű kék szárnyakkal rendelkeznek. A fajonként különböző árnyalatú kék szín összetett nanoszerkezettől származik, amely képes szelektíven kölcsönhatni a ráeső fehér fény különböző hullámhossz-tartományaiival: bizonyos hullámhosszak behatolnak a szerkezetbe (ahol szóródnak és a festékanyagokban elnyelődnek), míg mások visszaverődnek [1–3]. Az ilyen típusú nanoarchitektúrákat fotonikus kristály típusúnak nevezzük. A lepkék szárnypikkelyeiben található fotonikus nanoarchitektúra egy nanokompozit, amiben kitin- és levegőtartományok váltakoznak a látható fény hullámhosszának megfelelő (pár 100 nm) periodicitással. Ez a periodicitás, illetve a komponensek törésmutatója közötti eltérés, azaz a törésmutató-kontraszt alakítja ki a fotonikus kristály hullámhosszfüggő visszaverési

karakterisztikáját, az úgynevezett fotonikus tiltott sávot. A név az elektronok szilárdtestfizikából jól ismert tiltott sávjával analóg: amíg a félvezetőkben bizonyos energiájú elektronok nem tudnak terjedni az atomi szerkezetben, addig a fotonikus kristályok esetében a jól meghatározott energiájú (hullámhosszú) fotonok terjedése tiltott. Azonban a fotonikus kristályok jellemző méretei mintegy ezerszer nagyobbak, mint a szilárdtestek kristályszerkezetét leíró elemi cellák méretei. A nanoszerkezetek által ilyen módon visszavert fényt fizikai (vagy szerkezeti) színnek nevezzük, mivel a hullámhosszát tisztán a nanokompozit paraméterei határozzák meg.

A vizsgált lepkék és színváltozásuk

A kilenc vizsgált boglárkalepke-faj [4] – amandusz (*Polyommatus amandus*), égszínkék (*P. bellargus*), ezüstkék (*P. coridon*), csíkos (*P. damon*), csipkés (*P. daphnis*), mezei (*P. dorylas*), ikarusz (*P. icarus*), aprószemes (*P. semiargus*) és terzitész (*P. thersites*) – egyedei a Magyar Természettudományi Múzeum Állattárából származnak. Jellemző rájuk az ivari kétalakúság, azaz csak a hímek rendelkeznek élénk színű szárnyakkal, míg a nőstények barnák. Szárnyaikat tetőcserépszerűen apró kitinpikkelyek borítják, amelyek tipikusan $100 \times 50 \times 1 \mu\text{m}^3$ méretűek. A boglárkalepkék kék szárnypikkelyeinek belsejét egy háromdimenziós kitin-levegő nanoarchitektúra tölti ki, ami fotonikus kristályként viselkedik. Ha megváltoztatjuk az egyik összetevő anyagi minőségét, azaz például a levegőt valamilyen más anyaggal helyettesítjük, akkor megváltozik a nanoszerkezetben a törésmutató-kontraszt. Ezáltal eltolódik a visszavert fény spektrumának csúcspontját jellemző hullámhossz is, ami a szárny színének megváltozását eredményezi.

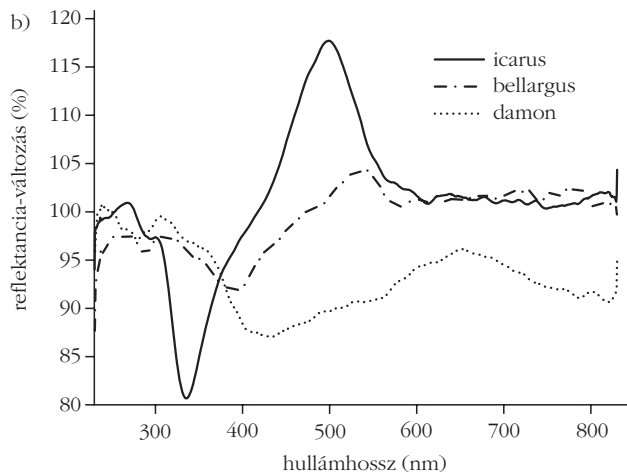
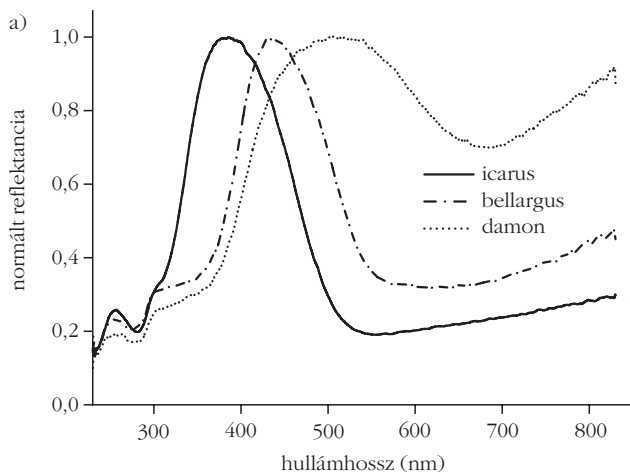
A struktúra feltérképezéséhez – a szárnyminták megfelelő előkészítése után – a pikkelyekről pásztázó (SEM) és keresztmetszeti transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvételeket készítettünk. Ezek alapján a pikkelyek háromdimenziós nanoszerkezetét összehasonlítottuk egymással. A SEM és TEM felvételeken [1–3] jól látható a pikkelyek háromdimenziós struktúrájának nyitott, szivacszerű felépítése. Ebből következően a kitin-levegő nanokompozit törésmutató-kontrasztja a nanoarchitektúra üregeit kitöltő közeg megváltoztatásával egyszerűen elhangolható. Ilyenkor a szer-

A munka az OTKA PD 83483 és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

¹ www.nanotechnology.hu

² www.nhmus.hu

³ www.ttk.mta.hu/intezetek/anyag-es-kornyeztkemiai-intezet



1. ábra. a) A három vizsgált boglárkalepke-faj (*Polyommatus icarus*, *P. bellargus*, *P. damon*) szárnyának 1-re normált fényvisszaverési spektruma a fehér (diffúz) referenciához viszonyítva. b) Ugyanazon fajok szárnyának válaszejele (definíció a szövegben) telített (100%) etanol gőzére.

kezetben található levegőt valamilyen illékony folyadék gőze és a levegő keverékére cserélve detektálható mértékű spektrális eltolódást tapasztalunk a szárnyon. A hatás magyarázata a gőz cseppfolyósodása a pikkelyekben. Mivel a fotonikus szerkezet pórusos és jellemző méretei a 100 nanométeres tartományban vannak, kapilláris kondenzáció történik [5].

A fentiek alapján olyan mérési elrendezés tervezhető meg, amely a lepkeszárnyat, mint optikai elvű szenzoranyagot alkalmazza: a karakterisztikus színváltozásból következtetni lehet a szenzort körülvevő gőz anyagi minőségére és koncentrációjára. A kapilláris kondenzáció jelenléte miatt fontos szerepet játszik a hőmérséklet és a gőzből lecsapódott folyadék felületi feszültsége.

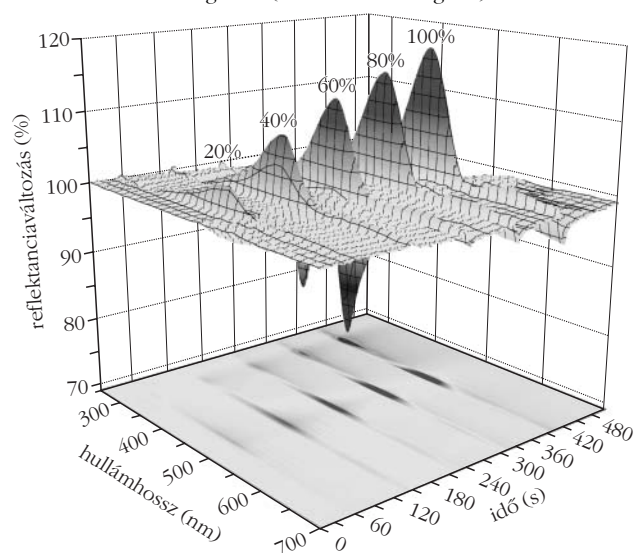
Vizsgálati módszerek

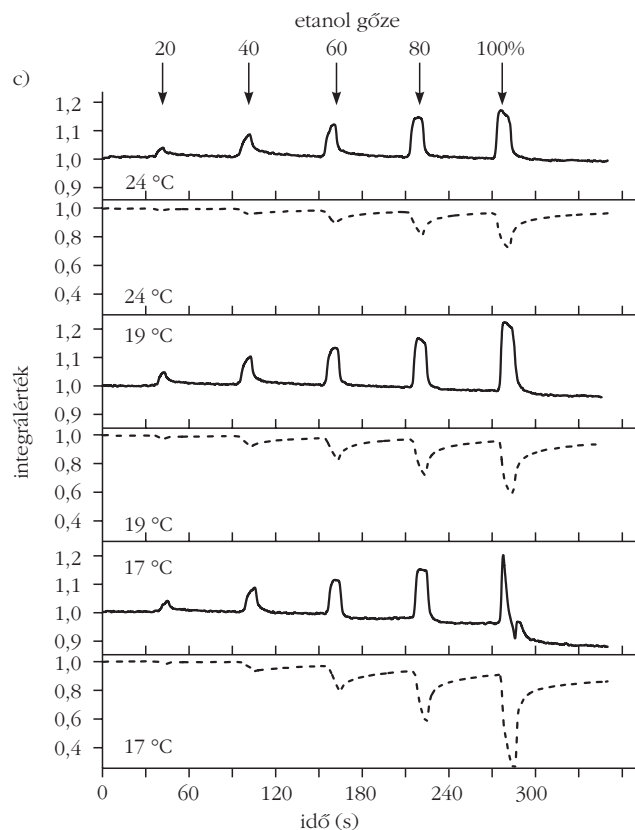
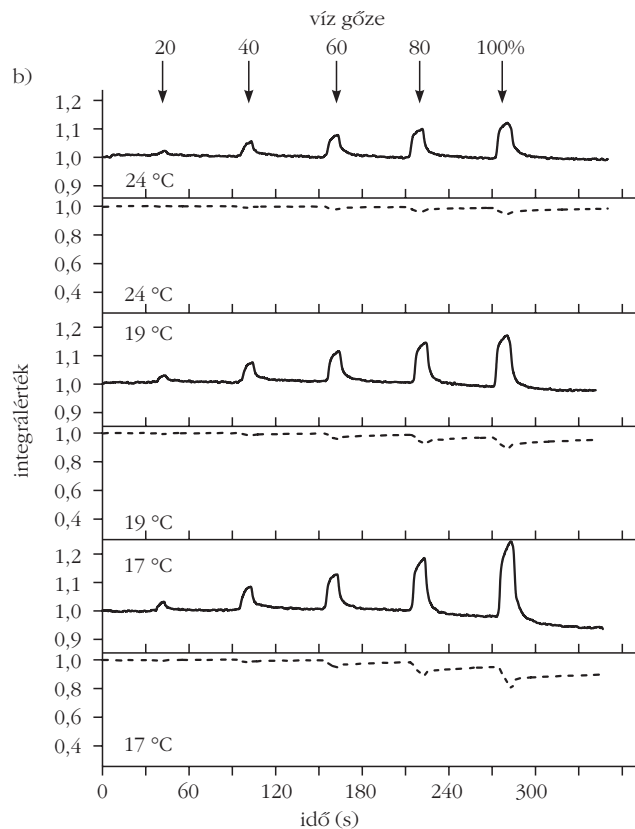
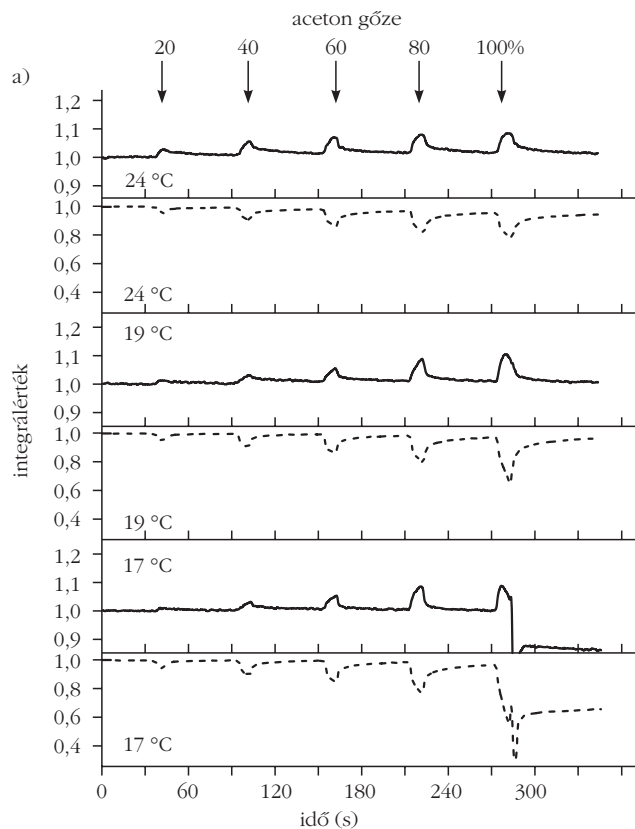
A gőz/gázérzékelési és optikai méréseink során – a minták mechanikai roncsolódását elkerülendő – a lepkeszárnyakat papírkeretbe helyeztük. Az így bekeretezett szárnyak pontosan illeszkedtek a gázcellaiba, ami egy légmentesen zárt alumíniumdoboz volt, a gázbeengedéshez szükséges csatlakozókkal és a fedőlapján egy kvarcablakkal, amin keresztül elvégezhetőek voltak a látható és ultraibolya tartományba eső optikai mérések. A gázkeverő rendszer számítógéppel vezérelhető gázáramlás-szabályzókból (*Aalborg*) állt, amelyek bemenetére szintetikus levegőt (Messer, 80% N₂, 20% O₂) tartalmazó gázpalackot kötöttünk. Az egyik szabályzó kimenetére a vizsgálni kívánt folyadékkal töltött, buborékolatós palackot csatlakoztatunk. Az így felépített eszköz segítségével pontosan meghatározható volt a vivőgáz és a palackon átbuborékolatott levegő mennyisége. A szintetikus levegőt és a telített gőzt hordozó (átbuborékolatott) levegőt előre megtervezett arányban (hozammal) összekeverve, beállítható volt a keverék kívánt gőzkoncentrációja. A keverékek összetételét kromatográfós mérésekkel hitelesítettük [5]. Vizsgálataink során a gázcella-

ban koncentrációtól független, állandó 1000 ml/perc áramlási sebességet biztosítottunk.

A keveréket a gázcellaiba juttatva száloptikás moduláris spektrofotométer (*Avantes HS-1024x122TEC*) segítségével vizsgáltuk a mintagőz által a lepkeszárnyon okozott színváltozást. Ehhez a szárnymintára merőleges megvilágítást és a fényvisszaverési maximumához igazodó detektálási irányt (~45°) használtunk. A gőzdetektálási mérésekben a spektrális jel relatív eltérését vizsgáltuk, amelyhez az áramló szintetikus levegőben rögzített reflektancia-spektrumot használtuk referenciaként. Ez azt jelenti, hogy a mérés kezdetekor rögzített szintetikus levegőt használtuk 100%-os jelként a teljes hullámhossztartományban, és a különböző gőzök hatására létrejövő eltéréseket tekintettük a gőzök hatását mutató jelnek (*1.b ábra*). Korábbi vizsgálatainkban megbizonyosodtunk arról, hogy a relatív spektrális jel időbeli változása is fontos infor-

2. ábra. A fényvisszaverés változása időben növekvő koncentrációk (20, 40, 60, 80, 100%) hatására a hullámhossz és az idő függvényében. A reflektancia-változás-tengelyen 100%-nak felel meg a szárny színe szintetikus levegőben (definíció a szövegben).





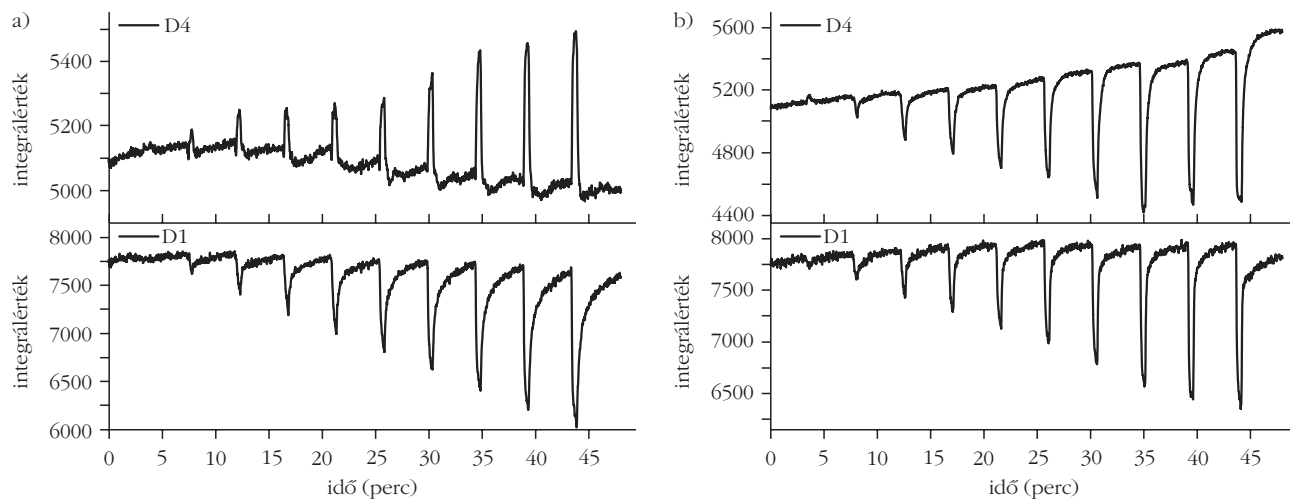
3. ábra. A *Polyommatus icarus* lepke szárnyán mérhető relatív fényvisszaverés (definíció a szövegben) pozitív (az integrált hullámhossztartomány 480–510 nm) és negatív (az integrált hullámhossztartomány 300–330 nm) csúcsok integráljai három hőmérsékleten (24, 19, 17 °C). Időben az aceton (a), víz (b) és etanol (c) gőzének koncentrációja 20, 40, 60, 80 és 100% volt (felső tengely).

mációkat hordoz, ezért a mérések során körülbelül egy másodperces felbontással rögzítettük a spektrumokat, amelyeket ezután háromdimenziós felületként ábrázoltunk (2. ábra). Az így kapott diagramon az x - y - z tengelyek a hullámhossznak, az időnek és a relatív spektrális megváltozásnak felelnek meg.

A gázcellába rögzített Peltier-elem segítségével lehetőségünk nyílt hőmérsékletfüggő kísérletek elvégzésére is, amikor a szárny hőmérsékletének a válaszjelre kifejtett hatását vizsgáltuk. Ehhez három különböző hőmérséklet mellett rögzítettük a szárny különböző gőzök hatására bekövetkező spektrális változásait, és ezeket összevetettük a szobahőmérsékleten kapott mérési adatsorokkal.

Kísérleti eredmények

Az egyes lepkefajok szárnypikkelyeit kitöltő nanoarchitektúrák általános felépítése nagyon hasonló egymáshoz, azonban az általuk előállított fizikai szín bizonyítottan fajspecifikus [2, 3]. A színárnyalatbeli különbségeket adó parányi különbségek feltárásához a szerkezetet leíró paraméterek részletes analízise szükséges. Ehhez nagyfelbontású elektronmikroszkópiát (SEM és TEM) és az osztályunkon fejlesztett szoftvert (BioPhot Analyzer) használtunk fel. Segítségükkel kimutattuk a lepkefajok és szárnypikkelyeik nanoarchitektúrája közötti korrelációt, illetve ilyen módon a fizikai szín árnyalata és a nanoarchitektúra szerkezete közötti kapcsolatot [3].



4. ábra. A kémiai szelektivitás bemutatására egy 50 perces mérés során 10%-os lépésekben növeltük az etanol (a) és a vízgőz (b) koncentrációját. A D1 és D4 görbék a visszaverési spektrumok integráljai a 250–350, valamint 700–750 nm tartományon.

A gáz/gőzérzékelési mérések előtt elvégeztük a lepkeszárnyak visszaverési spektrumainak felvételét áramló szintetikus levegőben. Ekkor a spektrométer gyártója által készített teflon referenciamintát használtuk viszonyításként. A reflektancia-spektrumokat közös grafikonon ábrázoltuk, és a kék tartományba eső csúcs maximumára normáltuk azokat, hogy karakterisztikus alakjuk könnyen összehasonlítható legyen. Ezek alapján megállapítottuk, hogy a vizsgált kilenc lepkefaj három színárnyalatsoportha rendezhető: lilás, kék és zöldeskék szárnyú fajok. A három csoportot jellemző egy-egy lepkefaj szárnyának reflektancia-spektruma az 1. a ábrán látható.

A gáz/gőzérzékelési kísérletsorozatot először szobahőmérsékleten, majd ezt követően megváltoztatott szenzorhőmérséklet mellett végeztük el a következő módon: kezdetben pár percen keresztül szintetikus levegőt áramoltattunk keresztül a gázérzékelő cellán, megtisztítva így a teljes rendszert a maradék szobalevegőtől. Ekkor elvégeztük a referenciaspektrum felvételét is, ami a gáz/gőzérzékelési kísérletekben a szárny minta – áramló mesterséges levegőben mért – reflexiós spektrumát jelenti. A szárnyak színváltozásának összehasonlíthatósága érdekében mind a kilenc lepkefajnál ugyanazt a mérési sorozatot alkalmaztuk: az egy perces levegőbeengedést egy perc telített gőz beengedése követte, majd a gőzt három perces szintetikus levegős mosás ürítette ki a rendszerből.

Az ötperces kísérlet során a spektrális jel megváltozott a referenciaszinthez képest. A beengedett gőzök hatására a spektrum bizonyos hullámhossztartományai csökkentek, míg mások megnöttek. Ennek oka a reflexiós spektrumok kék tartományában található csúcs nagyobb hullámhosszak felé történő eltolódása volt, amit a gőzök által elhangolt törésmutató-kontraszt változása okozott. A szintetikus levegővel történő mosás során a gőzök távoztak a nanokompozitból, ezáltal a spektrális jel visszatért a 100%-os referenciaszintre.

A három színárnyalatsoporthot szemléltető három lepkefajnál közös grafikonon ábrázoltuk az etanolgőz hatására létrejövő, maximális válaszjelű, relatív refle-

xiós spektrumokat (1. b ábra). Jól látható, hogy mindhárom esetben a kék tartományban lévő főmaximum környékén tapasztalható jelentős változás, amit a főcsúcs eltolódása okoz. A relatív spektrumokon ezen eltolódás pozitív és negatív csúcsok megjelenésében nyilvánul meg.

A gőzkoncentráció hatásának kimutatására kialakítottunk egy mérési protokollt, aminek alapján egy teljes mérés 10 másodperces gőzbeengedésekből és 50 másodperces szintetikus levegős atmoszféraiból állt. A szintetikus levegő után minden lépésben 20%-kal növeltük a gőzkoncentrációt, így a 2. ábrának megfelelő gőzkoncentráció – optikai válaszjel felületet kaptunk. Ennek időbeli metszeteként elkészíthetők az egyes gőzkoncentrációknak megfelelő, a korábban már bemutatott maximális spektrális változást bemutató grafikonokhoz hasonló (1. b ábra) görbék, míg a hullámhossz szerinti metszetek a kísérlet időbeli lefutását mutatják meg (hasonlóan a 3. és 4. ábrákhoz).

A gőzszenzor kémiai szelektivitásának (az egyes különböző gőzökre adott jellegzetes válaszjel) és érzékenységének vizsgálatához szükséges a 2. ábrán bemutatotthoz hasonló gáz/gőzérzékelési 3D felületeken látható spektrális csúcsok hullámhossz szerinti és időbeni viselkedésének jellemzése. Ehhez két, 30 nm széles hullámhossztartományon integráltuk a spektrumokat: 480–510 nm (maximum) és 300–330 nm (minimum), aminek eredményeként minden gőz esetében egy integrálpárt kaptunk (3. ábra). Várakozásainknak megfelelően a két integrál igazodott a 2. ábrán bemutatott, háromdimenziós adatsor alakjához, azaz a gőzbeengedésnek megfelelő időpontokban jelentek meg a nagy intenzitású pozitív, illetve negatív csúcsok. Ezen eljárás előnye, hogy a teljes folyamatot leíró 3D ábrából könnyebben kezelhető, de mégis jellemző 2D adatsorokat választunk le, amelyek lehetővé teszik egy újabb paraméter, a szárnyhőmérséklet hatásának vizsgálatát.

A mérőcellában elhelyezett Peltier-elemmel változtattuk a szárny minta hőmérsékletét a mérés során, és rögzítettük a megváltozott relatív reflexiós spektrumo-

kat. Mind a szobahőmérsékleten, mind a hűtött (19 °C, 17 °C) esetben mért adatsorokból elkészítettük a fent említett időfüggő integrálokat, amelyeket acetone, vízgőz és etanol esetében a 3. ábra mutat. A folytonos vonal a pozitív, a szaggatott vonal a negatív csúcs integrálját mutatja, míg az alkalmazott gőzök koncentrációja a grafikonok tetején látható.

Mindhárom gőzfajtnál megfigyelhető volt, hogy a gőzkoncentrációval arányosan nőtt a detektált optikai jel. Amennyiben egyeneseket illesztettünk az integrálcúcsok maximumértékeire, lineáris kapcsolatot tapasztaltunk a gőzkoncentráció és a spektrális válaszjel között [5]. A szárnyak hűtésekor is fennállt ezen egyenes arányosság a két mennyiség között, azonban a hőmérséklet csökkentésével növekedett a spektrális jel intenzitása. Ennek oka a szárny minta színváltoztató képességének mechanizmusában keresendő. Korábban említettük, hogy a szárny pikkelyek pórusos nanoarchitektúrájában kapilláris kondenzáció játszódik le, és ez módosítja a szerkezet törésmutató-kontrasztját. Azonban a hőmérséklet megváltozása hatással van a kondenzálódott gőz mennyiségére: hűtéskor megnő a szerkezetben a lecsapódott gőz mennyisége, ami a reflektált hullámhosszak nagyobb mértékű eltolódását okozza, így növekszik a detektált relatív reflexiós spektrumok és az ebből képzett időfüggő integrálok intenzitása is. A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a legalacsonyabb szárnyhőmérsékleten (17 °C) az acetonnak és az etanolnak megfelelő görbéken a legnagyobb alkalmazott koncentrációk esetében megváltozik a válaszjel alakja. Ez annak tulajdonítható, hogy az adott körülmények között a nanoarchitektúra teljes térfogata telítődik a kapilláris kondenzáció következtében cseppfolyósodott gőzzel [6].

A kémiai szelektivitás bemutatásához (4. ábra) meghosszabbított mérési időket és kisebb koncentrációlépcsőket alkalmaztunk. Ennek eredményeként egy közel 50 perces kísérletben vizsgáltuk az etanol és vízgőz hatását a lepkeszárny színére: a 30 másodperces gőzbeengedéseket négy perces szintetikus levegővel történő átmosás követte. A mért adatsorokból kiválasztottunk két hullámhossztartományt, amelyeken belül integráltunk: a két tartomány a gőzökre 250–350 nm (D1) és 700–750 nm (D4) volt. Mind a D1, mind a D4 integrál közel lineáris kapcsolatot mutatott a spektrális válaszjel és az alkalmazott gőzök koncentrációja között. Azonban etanol- és vízgőz esetében az integrálok alakja jelentősen eltért egymástól,

ami a D4 görbe vizsgálatával jól látható: míg az etanolgőz koncentrációjának növelésével az integrál értéke nőtt, addig a vízgőznél csökkenő jelet kaptunk. Kevésbé látványos, de ugyancsak karakterisztikus különbség volt felfedezhető a D1 görbe esetében is, ahol a cella atmoszférájánál fellépő intenzitáscsökkenés az etanolgőznél egyenletesebb és hosszabb időt vett igénybe, míg a vízgőznél a változás sokkal gyorsabb volt [6]. Jól látható tehát, hogy az integrálási tartományok megfelelő kiválasztásával a teljes 3D adatsorból (2. ábra) kiválaszthatók azok a tartományok, amelyek a nanoarchitektúrában kiváltott válaszjelük alapján legalkalmasabbak arra, hogy bizonyos, egymástól eltérő kémiai anyagokat megkülönböztessünk egymástól.

Következtetések

Kutatásunk során boglárkalepkék szárny pikkelyeiben található fotonikus nanoarchitektúrák gáz/gőzérzékelési tulajdonságait vizsgáltuk. Két kísérletsorozat alapján bemutattuk, hogy a kék lepkeszárnyak felhasználásával érzékeny és kémiaiilag szelektív gáz/gőzérzékelő készíthető. Kilenc boglárkalepke-fajnál vizsgáltuk a szárny színének megváltozását különféle gőzök hatására. A megvizsgált fajokat három csoportra lehet osztani: a liláskék, a kék és a zöldeskék árnyalatú csoportra (1. ábra), amelyek jellemző képviselői a *Polyommatus icarus* (liláskék), a *Polyommatus belargus* (kék) és a *Polyommatus damon* (zöldeskék). A liláskék csoport bizonyult a leginkább alkalmasnak a gáz/gőzérzékelésre. A minták hőmérséklete szerinti méréseket is végeztünk, és megállapítottuk, hogy a szobahőmérséklet alá hűtött minták gőzök által kiváltott optikai válaszjele megnő. Azonban meg kell jegyezni, hogy nagy gőzkoncentrációk esetében a nanoarchitektúra cseppfolyósodott gőzzel való telítődése nyomán megváltozik a válaszjel alakja, ezt a kiértékelésben tekintetbe kell venni. Mivel a különböző lepkefajokon más-más optikai válaszjelek mérhetők, ezért megfelelő számú és jellegű szárny minta alkalmazásával – várhatóan – a gőzkeverékek kémiai összetétele is elemezhető lesz.

Természetesen nem zárható ki, hogy különféle, mesterséges nanoarchitektúrák, mint például az aerogélek versenyképeseknek bizonyulnak majd a lepkeszárnyakban előforduló fotonikus nanoarchitektúrák-



SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!

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

kal, azonban a fent bemutatott biológiai eredetű nanoarchitektúráknak van néhány figyelemreméltó előnye a mesterségesekkel szemben:

- a szárnyaknak fontos szerepük van a lepkék szexuális kommunikációjában, színük – és ezáltal nanoarchitektúrájuk is – generációról generációra igen pontosan reprodukálódik,
- a lepkék tenyésztésével könnyen, környezetkímélő módon és olcsón előállíthatók a szárnyak, ellentétben a mesterséges nanoarchitektúrák gyakran bonyolult, költséges és környezetet károsító gyártásával,
- számos lepkefaj esetén már bizonyított, hogy színük fotonikus nanoarchitektúráknak tulajdonítható, a biológiai evolúció egy gazdag „nanoarchitektúra könyvtárral” látott el minket, amelynek feltárhatjuk a hasznos tulajdonságait.

Irodalom

1. Bálint Zs., Biró L. P.: A lepkék színeváltozása. *Természet világa* 135/7(2004) 311–313.
2. Piszter G., Kertész K., Vétesy Z., Bálint Zs., Biró L. P.: Color based discrimination of chitin-air nanocomposites in butterfly scales and their role in conspecific recognition. *Anal. Methods* 3 (2010) 78–83.
3. Kertész K., Piszter G., Bálint Zs., Vétesy Z., Biró L. P.: Színek harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe – I. és II. rész. *Fizikai Szemle* 63 (2013) 231–234, 293–298.
4. Bálint Zs., Kertész K., Piszter G., Vétesy Z., Biró L. P.: The well-tuned blues: the role of structural colours as optical signals in species recognition of a local butterfly fauna (Lepidoptera: Lycaenidae: Polyommatainae). *J. R. Soc. Interface* 9 (2012) 1745–1756.
5. Kertész K., Piszter G., Jakab E., Bálint Zs., Vétesy Z., Biró L. P.: Color change of blue butterfly wing scales in an air-vapor ambient. *Applied Surface Science* 281 (2013) 49–53.
6. Kertész K., Piszter G., Jakab E., Bálint Zs., Vétesy Z., Biró L. P.: Selective optical gas sensors using butterfly wing scales nanostructures. *Key Engineering Materials* 543 (2013) 97–100.

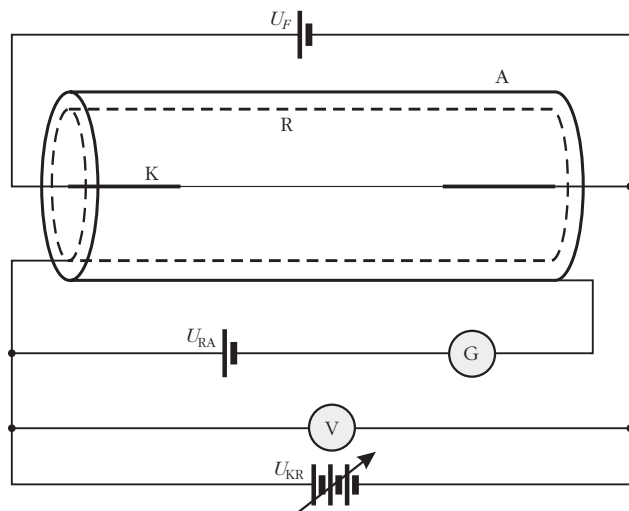
FRANCK–HERTZ-KÍSÉRLET 100 ÉVE ÉS MA

Donkó Zoltán, Korolov Ihor
MTA Wigner FK SZFI Komplex Folyadékok Osztály
Magyar Péter
ELTE Fizikus Szak

A Franck–Hertz-kísérlet anno

James Franck és Gustav Ludwig Hertz 1914-ben publikálták cikküket [1], amiben a később nevükkel jelzett, az elektronok és atomok kölcsönhatását tanulmányozó kísérletüket és annak értelmezését ismertették. Eredményeik fontos bizonyítékot szolgáltattak a kvantált atomi energiaszintek létezésére – munkájukat 1925-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazták [2]. Mérési

1. ábra. A Franck–Hertz-kísérlet elvi vázlata [1]. Az elektronokat a K jelű, U_F feszültséggel izzított szál bocsátja ki és az U_{KR} feszültség gyorsítja. Az elegendően nagy energiájú, U_{RA} lassítófeszültséget leküzdő elektronok eljuthatnak az A jelű anódra, áramukat a G galvanométer méri.



elrendezésük elvi vázlata az 1. ábrán látható. Kísérleti eszközük hengersizmetrikus elrendezésű volt, egy üveggöpenyben foglalt helyet a három, platinából készült elektróda. Az elektronok mozgását és ütközési folyamatait Hg-gőzben vizsgálták, amelynek nyomását a cellát körülvevő paraffinfürdő hőmérsékletével állították be. A cső tengelyén kifeszített, katódként szolgáló, U_F feszültséggel izzított vékony szál (K) bocsátotta ki az elektronokat, amelyeket egy hengeralakú rácsla (R) kapcsolt U_{KR} feszültséggel gyorsítottak. A rácsl és az anód közé egy ellentert (U_{RA} „lassítófeszültséget”) kapcsoltak. Az ezt leküzdni képes elektronokat a platinafóliából készült hengeres anód gyűjtötte össze, amelyhez érzékeny galvanométert (G) kapcsoltak.

A kísérletek során Franck és Hertz az anódáramot mérték a gyorsítófeszültség függvényében, állandó értéken tartott lassítófeszültség mellett. Az 1914-es cikkükből [1] átvett 2. ábrán jól látható az anódáram periodikus váltakozása a gyorsítófeszültség függvényében. Kis gyorsítófeszültségek mellett az elektronok csak rugalmasan ütköztek a Hg-atomokkal – ezen ütközések során az energiavesztés igen kicsi, az elektronok és a Hg-atomok tömegarányának nagyságrendjébe esik –, így elegendő energiájuk maradt a lassító tér leküzdésére és el tudták érni az anódot. Az $U_{KR} = 4,9$ V gyorsítófeszültségnél megfigyelhető hirtelen csökkenést a rugalmatlan elektron – Hg-atom ütközések megjelenése, a Hg-atomok gerjesztése okozza. Az ezzel egyidejűleg megjelenő, 4,9 eV energiához tartozó, 253,6 nm hullámhosszú