

Kísérletileg legkönnyebben az a feltevés ellenőrizhető, amely egy semleges sötétanyag-részecskét kísérő gamma-sugárzást tételez fel. A sötétanyag-részecske tömege nagyobb kell legyen a proton és az elektron tömegkülönbségénél, hogy ez a „magyarázat” ne kerüljön ellentmondásba a protonstabilitásra vonatkozó igen pontos eredményekkel.

Ha ez a folyamat létezik, akkor a neutron egzotikus bomlása révén atommagokban is bekövetkezhet hasonló átalakulás eggyel alacsonyabb atomszámú, ám változatlan rendszámú magba (hiszen ebben a folyamatban a nukleonok száma állandó protonszám mellett eggyel csökken). E lehetőség kizárásának követelményéből, az alkalmas izotópok tömegtáblázatát átvizsgálva, a ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}$ átmenet hiányából az egzotikus bomlásban keletkező sötét részecske tömegére 937,900 MeV nagyságú alsó korlátot vontak le.

A feles spinű χ sötétanyag-részecskét vagy egy γ -foton vagy egy ϕ sötét bozon kísérheti. Végül a következő reakciók elemzését végezték el:

$$n \rightarrow \chi + \gamma, \quad n \rightarrow \chi + \phi, \quad n \rightarrow \chi + e^+ + e^-.$$

A kísérő foton energiájára a nehéz χ fermionra vonatkozó tömegkorlát és az energiamegmaradás alapján:

$$0,782 \text{ MeV} < E_\gamma < 1,664 \text{ MeV}$$

megengedett tartomány adódik. Az elektron-pozitron végállapotú pár virtuális foton révén jöhet létre, így a fenti korlátok lefordíthatók a pár teljes energiájára is. Természetesen ez a bomlás, ha létezik, a csapdázott neutronokra is fellép. Ezt felismerve az elméleti felvételt követő egy hónapon belül germániumdetektort is hozzáépítettek a Los Alamos-i kísérlet berendezése köré. Ám a várt jel nem jelentkezett.

A tisztán sötétanyag-részecske-párba történő bomlás lehetősége persze még megmaradt. Számos további elméleti magyarázó próbálkozást közöltek, de egyelőre egyikre sincs bizonyíték.

A két mérési eljárás közötti szisztematikus eltérés technikai vagy fizikai okának megtalálása mind az alapvető kölcsönhatások fizikája, mind a kozmológia számára izgalmas kihívás, alapvető ismeretet rejt a gyenge kölcsönhatás természetét illetően, és tisztázása nyilván nem igényel dollármilliárdokat!

PORÓZUS ARANY NANORÉSZECSKÉK OPTIKAI TULAJDONSÁGAINAK KEVERT FÉM-OXIDRÉTEGEKKEL TÖRTÉNŐ HANGOLÁSA

Juhász Laura,¹ Parditka Bence,¹ Petrik Péter,² Erdélyi Zoltán,¹ Cserháti Csaba¹

¹Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Szilárdtest Fizikai Tanszék

²Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Budapest

A porózus arany nanorészecskék – kedvező felszín/térfogat arányuknak, valamint kiváló plazmonikai tulajdonságaiknak köszönhetően – igen népszerűek. Munkánk során ilyen nanorészecskéket állítottunk elő, majd vontunk be különböző, vékony fém-oxidrétegekkel és vizsgáltuk a részecskék termikus stabilitását, illetve optikai tulajdonságait. A nanorészecskék

bevonatát képező rétegben az alumínium-oxid és titán-dioxid arányának változtatásával sikeresen tudtuk hangolni a nanorészecskék optikai tulajdonságait.



A porózus anyagok rendkívül érdekesnek számítanak a tudomány, különösen a nanotechnológia területén, hiszen a nanoméretben előállított porózus struktúrák a tömbi anyagokhoz képest jelentősen eltérő fizikai és kémiai tulajdonsággal rendelkezhetnek.

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) bemutatott poszter alapján.



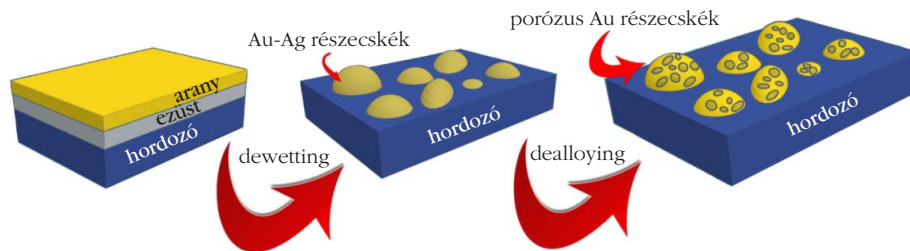
Juhász Laura okleveles fizikus, 2016-tól a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének PhD-hallgatója. Doktori témája atommozzgási folyamatok vizsgálata 2D és 3D fém-oxidrendszerekben, jelenleg porózus arany nanorészecskék termikus stabilitását és optikai tulajdonságait vizsgálja.



Parditka Bence István a Debreceni Egyetemen és a marseille-i Aix-Marseille Egyetemen szerzett doktori diplomát fizika és anyagtudomány területen. Kutatási területe korábbiakban különböző, fizikai rétegleválasztással, vékonyrétegekben készült szilicidfázisok kialakulása és növekedésük kezdeti fázisainak vizsgálata volt. Jelenleg – többek között – kémiai rétegleválasztással előállított oxidrétegek antibakteriális és fotokatalitikus tulajdonságainak vizsgálatával foglalkozik.

A nanorészecske definíció szerint olyan mikroszkopikus objektum, amelynek legalább egy karakterisztikus dimenziója 100 nanométernél kisebb. A tömör fém nanorészecskék optikai viselkedésük miatt, amelyek közül kiemelkedik azon tulajdonságuk, hogy a megvilágító fény hatá-

sára a plazmonrezonancia – azaz a vezetési sávban lévő elektronok kollektív oszcillációjának – jelenségét mutatják különleges szerepet töltenek be számos alkalmazás tekintetében [1, 2]. Ez a rezonancia ráadásul térben lokalizáltan jelenik meg, hiszen a vezetési sávban lévő szabad elektronok fizikailag a nanorészecskébe vannak „zárva”. A részecskék alakja és mérete, valamint lokális környezete meghatározza a plazmonrezonancia hullámhosszát, ami tömör részecskék esetében a látható fény hullámhossztartományában jelentős. A tömör fém nanorészecskék mellett egyre nagyobb figyelmet kapnak porózus párjaik, amelyeknek nem csak felszín/térfogat arányuk nagyobb, hanem a porozitás hatására optikai tulajdonságaik is megváltoznak, ami azt jelenti, hogy a tömör nanorészecskék láthatófény-tartományban jellemző plazmonrezonancia-csúcsa a pórusok hatására a közeli infravörös tartomány felé tolódik. A porózus arany nanorészecskék



1. ábra. Porózus arany nanorészecskék előállításának sematikus rajza.

(Porous Gold Nanoparticles = PGN) ennek köszönhetően szintén kiváló jelöltek orvosbiológiai, szenzorikai, szemészeti, valamint rákterápiás alkalmazások számára is [3–6].

Porózus arany nanorészecskéket kontrollált részecske-, illetve pórusmérettel az úgynevezett „dewetting – dealloying” módszer segítségével állíthatunk elő [7, 8]. Ennek során arany-ezüst birétegeket hőkezelünk magas, 850 °C hőmérsékleten. A hőkezelés hatására a hordozó felületén arany-ezüst ötvözet nanorészecskéket kapunk (dewetting), amelyből az ezüst szelektív kémiai oldásával (HNO_3) és aranyatomok új, háromdimenziós szerkezetté történő átrendeződésével porózus arany nanorészecskék alakulnak ki (dealloying). Az 1. ábra sematikus szemlélteti a porózus arany nanorészecskék előállításának folyamatát.

Korábbi megfigyelések is igazolják, hogy ezen nagy felület/térfogat aránnyal rendelkező nanorészecskék szerkezete termikusan instabil, alacsony hőmérsékleten történő hőkezelés hatására struktúrájuk a felületi diffúzió miatt változhat, vagy akár teljesen el is tűnhet [4]. Ismert, hogy a pórusos nanorészecskéket vékony (~5 nm) fém-oxidréteggel (Al_2O_3 , TiO_2) bevonva, a szerkezet a hőkezelés után is megőrizhető [8, 9]. Azt is megmutatták, hogy ez a mindössze 5 nm vastag fém-oxidréteg magas hőmérsékletig képes megőrizni nem csak a morfológiai, hanem az optikai tulajdonságokat is [7, 8]. Saját kísérleteinkben bizonyítottuk, hogy a különböző fém-oxidrétegek – eltérő törésmutatóik miatt – más-más módon befolyásolják az optikai tulajdonságokat [9]. A terület irodalma szerint az optikai tulajdonságok leginkább a részecskék méretének változtatásával módosíthatók [3]. Célunk az volt, hogy a részecskék méretét nem változtatva, csupán a bevonó réteg Al_2O_3 , illetve TiO_2 arányának (azaz a bevonó réteg törésmutatójának) módosításával, kontrolláltan tudjuk változtatni a minta optikai elnyelési spektrumát.

Kísérleti összefoglaló

A részecskéket termikusan növesztett oxidréteggel el látott SiO_2/Si szilíciumhordozóra, illetve zafírra gyártottuk. A zafírhordozót az optikai vizsgálatokhoz használtuk. Első lépésben 6 nm Au/16 nm Ag biréteget állítottunk elő magnetronos porlasztással. A biréteget 30 percig 850 °C-on dinamikus atmoszférán (95% Ar – 5% H_2) hőkezeljük. Ezt az eljárást nevezzük dewet-



Petrik Péter az Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézete Fotonika Laboratóriumának vezetője. Diplomája (BME, 1994), PhD-értekezése (BME, 2000) és MTA doktora (2015) is optikai vizsgálati módszerek fejlesztéséhez alkalmazásához kötődik. Vendégkutatóként közel öt évet töltött Németországban, az USA-ban és Hollandiában. Vékonyrétegek és szilárd-folyadék határfelületek folyamatkövető vizsgálati módszereinek fejlesztésével foglalkozik.



Erdélyi Zoltán az MTA doktora, a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára. PhD-fokozatot anyagtudományból Franciaországban, fizikából a Debreceni Egyetemen szerzett. Több európai és egy japán egyetemen volt vendégprofesszor, vendégkutató. Főbb kutatási területe az atommozgási folyamatokkal összefüggő jelenségek kísérleti és elméleti vizsgálata. Munkásságát Selényi Pál-díjjal ismerték el.



Cserbáti Csaba egyetemi docens, okleveles fizikus, 1989-től a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Intézetének munkatársa. Több külföldi egyetemen volt vendégkutató. Kutatási tevékenysége a szilárdtestekben különböző méretskálán lejátszódó diffúziós, valamint szilárdtest-reakációs jelenségek, elsősorban kísérleti vizsgálata. Az ELFT Anyagtudományi szakszempontjának elnöke.

1. táblázat

A különböző bevonó rétegek összetétele

réteg neve	réteg összetétele
1. típusú réteg	Al ₂ O ₃
2. típusú réteg	65% Al ₂ O ₃ – 35% TiO ₂
3. típusú réteg	35% Al ₂ O ₃ – 65% TiO ₂
4. típusú réteg	TiO ₂

tingnek. A hőkezelés eredményeként ~300 nm átmérőjű Au-Ag félgömb alakú ötvözetrészcsek formálódnak a hordozó felszínén. Ezután a mintákat 65 wt. % salétromsavba merítettük. A maratás az ezüstöt szelektíven oldja az ötvözetrészcsekből, illetve az arany atomok új, háromdimenziós szerkezetté alakulását okozza („dealloying”), így alakítva ki a porózus arany nanorészecskéket. A részecskék bevonását plazmasegített atomi rétegleválasztási módszerrel végeztük. Ezzel az eljárással alacsony hőmérsékleten lehet háromdimenziós szerkezeteket vékony, folytonos fém-oxidréteggel bevonni. Al(CH₃)₃-, TiCl₄- és oxigénplazma segítségével állítottunk elő négy, különböző bevonó réteggel ellátott PGN-t. A bevonó rétegek pontos összetétele az 1. táblázatban olvasható.

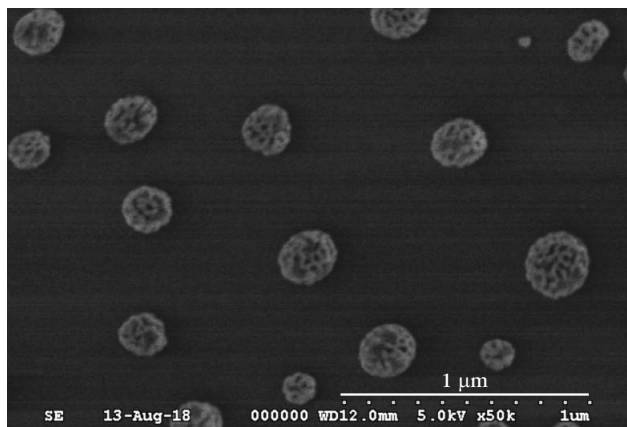
A mintákat 350 °C és 700 °C közötti hőmérsékleteken 1 órán keresztül levegőn hőkezeltük, majd a morfológiai változásokat pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. Az optikai tulajdonságok vizsgálatát spektrofotométerrel végeztük 300–2000 nm hullámhossztartományban. A bevonó rétegek törésmutatójának meghatározása ellipszométerrel történt.

Eredmények

Morfológia

A 350 °C hőkezelés nem okoz változást a morfológiában a 2. típusú kevert fém-oxiddal bevont részecskék esetében, ezt az állapotot szemlélteti a 2. ábra. Magasabb hőmérsékleten (700 °C) történő hőkezelés esetében a PGN szerkezete továbbra is stabil, viszont az

2. ábra. Az 2. típusú kevert réteggel bevont részecskék elektronmikroszkópos képe 1 órányi, 350 °C-os hőkezelés után.



arany diffúziója megkezdődik, amelyet sötét és világos részek mutatnak a részecskék felszínén. Energia-diszperzív röntgenspektrometria segítségével megmutattuk, hogy a sötét részek nem, a világos tartományok viszont tartalmaznak aranyat.

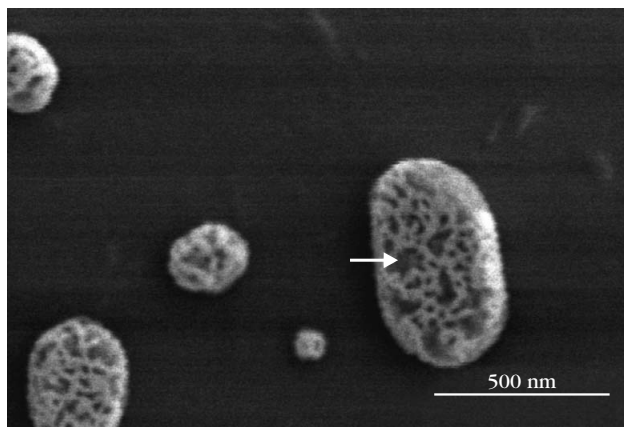
A korábbi eredmények szerint az Al₂O₃ 900 °C hőmérsékletig képes megőrizni a PGN szerkezetét [4, 7–9], emiatt a magasabb Al₂O₃-tartalmú 2. típusú mintát 900 °C-ig hőkezeltük. A mérések szerint a bevonó réteg még ezen a hőmérsékleten is stabilitást adott a részecskéknek. A 3. típusú kevert fém-oxidréteggel bevont PGN esetében a sötét és világos területek már alacsonyabb, ~450 °C hőmérsékleten történő hőkezelés hatására is megjelentek, amely a 3. ábrán is jól látható. Az ilyen típusú réteggel bevont részecskék viszont 700 °C felett – köszönhetően a réteg magasabb TiO₂-tartalmának – már nem képesek megőrizni a részecskék stabilitását.

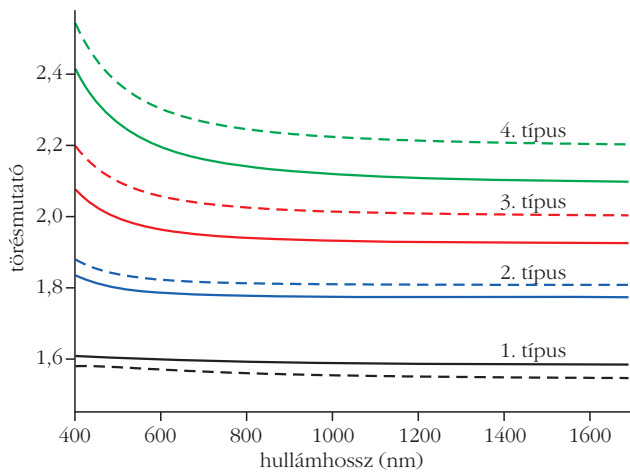
Optikai tulajdonságok

Az optikai vizsgálatok során extinkciós spektrumokat mértünk 300–2000 nm hullámhossztartományban. A spektrumban 2 plazmoncsúcs volt megfigyelhető [7]. A közeliinfravörös-tartományban található plazmoncsúcsot (~1200–1400 nm) dipól plazmoncsúcsnak nevezzük. A részecskék optikai tulajdonságai rendkívül érzékenyek az azokat fedő anyagra. Korábbi munkánk során megmutattuk, hogy az Al₂O₃-dal történő bevonás esetében ~100 nm nagyságú eltolódás figyelhető meg a hosszabb hullámhossztartomány felé a dipólcsúcs pozíciójában, míg a TiO₂ esetében ez az érték közel négyszer nagyobb (~400 nm) [9].

A 4. ábrán a különböző bevonó rétegek, illetve a hőkezelt rétegek törésmutatója látszik. A törésmutatók változásában is jól látható, hogy a kezdetben amorf TiO₂-réteg (4. ábra legfelső folytonos vonala) a 650 °C hőkezelés után anatóz fázissá alakul, törésmutatója jelentősen megnő (4. ábra legfelső szaggatott vonala). A TiO₂ anatóz fázissá alakulását transzmissziós elektronmikroszkóppal végzett elektron diffrakciós vizsgálataink is igazolták. Az Al₂O₃ a hőkezelések

3. ábra. Az 3. típusú kevert réteggel bevont részecskék elektronmikroszkópos képe 1 óra hosszú, 450 °C-on történt hőkezelés után. A nyíl azt a sötét területet mutatja, ahol már nem található arany.



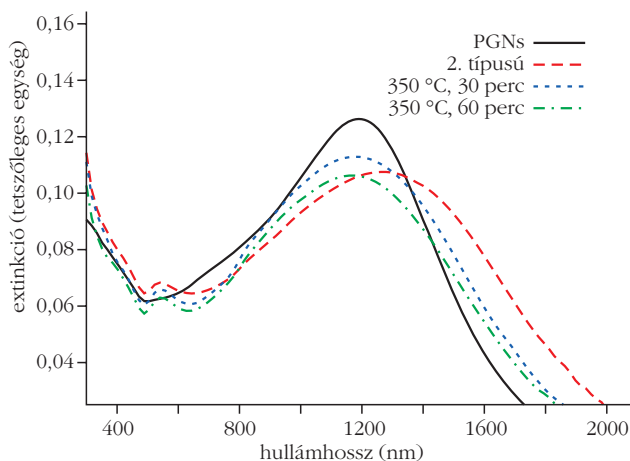


4. ábra. Hőkezeletlen (folytonos) és 650 °C-on, 1 órán át levegőn hőkezelt (szaggatott) bevonó rétegek törésmutatója a hullámhossz függvényében.

után is amorf marad az általunk vizsgált hőmérséklet-tartományban, emiatt törésmutatója sem változik a teljes hullámhossztartományon. Az 2. és 3. típusú rétegek törésmutatójának értékét az határozza meg, hogy milyen arányban tartalmazza a két fém-oxidot. A 650 °C-os hőkezelés hatására a kevert fém-oxidrétegek törésmutatója enyhén növekszik a teljes hullámhossztartományon.

Az 5. ábrán a 2. típusú kevert fém-oxidréteggel bevont nanorészecskék elnyelési spektrumai láthatók. Az ábra folytonos vonala mutatja a részecskék extinkciós spektrumát a bevonás előtt, míg a szaggatott a bevonás után. Ezen vonalakat összehasonlítva láthatjuk, hogy az 2. típusú kevert fém-oxidréteg enyhe eltolódást okoz az infravörös-tartomány felé a dipól plazmoncsúcs pozíciójában. Az aprón szaggatott, illetve pontozva szaggatott vonalak a spektrumokat 30, illetve 60 perces hőkezelések után mutatják. Látható, hogy a hőkezelések hatása a maximumok enyhe eltolódása a rövidebb hullámhosszak felé. Korábbi eredményeink alapján tudjuk, hogy a TiO₂-dal bevont részecskék spektrumában már alacsony hőmérsékleten történő hőkezelés esetén is enyhe eltolódás figyelhető meg a kék szín irányába [9].

5. ábra. Az 2. típusú kevert réteggel bevont porózus arany nanorészecskék extinkciós spektrumai 350 °C-os hőkezelés után.



Megfigyeléseink alapján ez a rövidebb hullámhossztartomány felé történő eltolódás már a 2. típusú kevert oxidréteggel bevont részecskék 350 °C hőmérsékleten történő hőkezelése esetében is látható. Ebben az esetben magas hőmérsékleten történő hőkezelések után is megőrződnek – a morfológiai tulajdonságok mellett – az optikai tulajdonságok, köszönhetően a bevonó réteg magas Al₂O₃-tartalmának. A 900 °C-on 30 percig történő hőkezelés hatására az eltolódás sokkal jelentősebb (~300 nm), ami újabb 30 perces hőkezelés hatására már nem változik jelentősen.

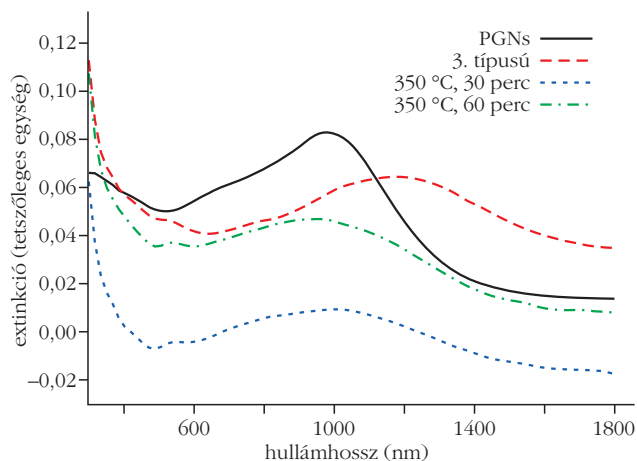
A 6. ábrán láthatók a 3. típusú kevert réteggel bevont részecskék extinkciós spektrumai a 350 °C-os hőkezelés után. A bevonás hatására a dipólcsúcs kezdeti eltolódása a hosszabb hullámhossztartomány felé nagyobb (~200 nm), mint a 2. típusúak esetében (köszönhetően a réteg magasabb TiO₂-tartalmának), ami a 6. ábra folytonos, illetve szaggatott vonalát összehasonlítva jól látható. A 3. típusú réteggel bevont részecskék esetében a hőkezelések eredménye is jelentősebb (~150 nm) eltolódás a rövidebb hullámhossztartomány felé (6. ábra aprón szaggatott, illetve pontozva szaggatott vonala). A hőkezelési hőmérséklet növelésével az eltolódás itt is egyre jelentősebbé válik.

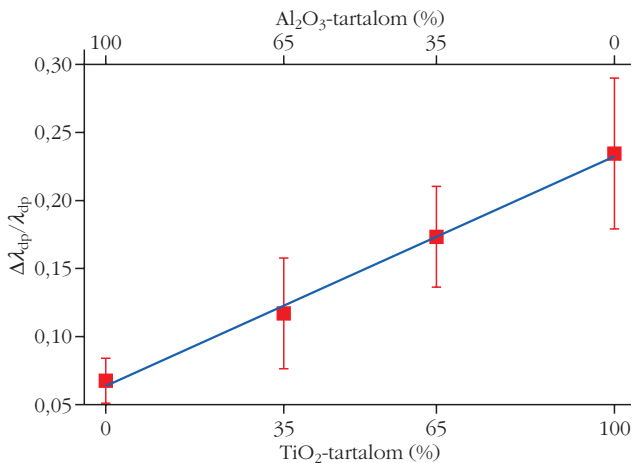
A 7. ábra különböző arányú bevonó rétegek esetében mutatja a dipól plazmoncsúcs pozíciójának relatív eltolódását. Jól látható, hogy minél nagyobb a bevonó réteg TiO₂-tartalma, annál jelentősebb relatív eltolódást figyelhetünk meg a dipól plazmoncsúcs pozíciójában.

Összefoglalás

Munkánk során Al₂O₃ és TiO₂ keverékével vontunk be porózus arany nanorészecskéket plazmasegített atomi rétegleválasztási eljárással. Két különböző összetételű, kevert fém-oxidréteggel bevont arany nanorészecskéket vizsgáltunk és megmutattuk, hogy a bevonó réteg Al₂O₃ és TiO₂ arányának változtatásával, azaz a bevonó réteg törésmutatójának kontrollált módosításával, a részecskék plazmonikai tulajdonságai hangolhatóvá válnak anélkül,

6. ábra. A 3. típusú kevert réteggel bevont porózus arany nanorészecskék extinkciós spektrumai 350 °C-os hőkezelés után.





7. ábra. A dipól plazmonsúcs pozíciójának relatív eltolódása a bevonó rétegek TiO₂/Al₂O₃ tartalmának függvényében.

hogy a részecskeméretet változtatnánk. Mindemlélt a keverék fém-oxiddal bevont porózus arany nanorészecskék termikus stabilitását is vizsgáltuk. Azt találtuk, hogy a TiO₂ fázisátalakulási hőmérsékletéig a részecskék termikusan stabilak maradnak, szerkezetük, valamint optikai tulajdonságaik magas hőmérsékletű hőkezelés után is megőrződnek.

VÉLEMÉNYEK

A FIZIKATANÍTÁS AKTUÁLIS PROBLÉMÁIRÓL

Almási János

Budapesti Egyetemi Katolikus Gimnázium

A fizikatanítás során az elmúlt években iskolánkban kommunikációs problémákat, a motiváltság hiányát, a fizika tantárgy kedveltségének csökkenését, az érettségizők számának csökkenését, a koncentráció és figyelem hiányát, általános iskolából hozott hiányosságokat, a természettudományi tantárgyak összehangolásának hiányát tapasztaltuk. Ezen problémák okát próbálja feltárni, az okokra magyarázatot találni és egyfajta választ és megoldást nyújtani a következő gondolatsor.



Almási János a Budapesti Egyetemi Katolikus Gimnázium matematika-fizika-kémia szakos tanára, innovátor mesterpedagógus, az ELFT tagja. Közel 30 éve tanít fizikát általános iskolában, gimnáziumban, esti gimnáziumban. 2001-ben az Öveges József Fizikaverseny országos döntőjén elért I. helyezés okán az ELFT Öveges-érmével díjazta őt és Nagy Róbert tanítványát.

Irodalom

1. M. A. Garcia: Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications. *Journal of Physics D Applied Physics* 44 (2011) 283001.
2. C. L. Nehl, J. H. Hafner: Shape-dependent plasmon resonances of gold nanoparticles. *J. Mater. Chem.* 18 (2008) 2415–2419.
3. A. M. Hodge, J. R. Hayes, J. A. Carol, J. Biener, A. V. Hamza: Characterization and mechanical behavior of nanoporous gold. *Adv. Eng. Mater.* 8 (2006) 853–857.
4. A. Kosinova, D. Wang, P. Schaaf, O. Kovalenko, L. Klinger, E. Rabkin: Fabrication of hollow gold nanoparticles by dewetting, dealloying and coarsening. *Acta Materialia* 102 (2016) 108–115.
5. Y. Sun, B. Mayers, Y. Xia: Template-Engaged Replacement Reaction. A One-Step Approach to the Large-Scale Synthesis of Metal Nanostructures with Hollow Interiors. *Nano Lett.* 2 (2002) 481–485.
6. Y. Sun, B. Mayers, Y. Xia: Metal nanostructures with hollow interiors. *Adv. Mater.* 25 (2003) 641–646.
7. A. Kosinova, D. Wang, E. Baradács, B. Parditka, T. Kups, L. Klinger, Z. Erdélyi, P. Schaaf, E. Rabkin: Tuning the nanoscale morphology and optical properties of porous gold nanoparticles by surface passivation and annealing. *Acta Materialia* 127 (2017) 108–116.
8. W. Rao, D. Wang, T. Kups, E. Baradács, B. Parditka, Z. Erdélyi, P. Schaaf: Nanoporous Gold Nanoparticles and Au/Al₂O₃ Hybrid Nanoparticles with Large Tunability of Plasmonic Properties. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9/7 (2017) 6273–6281.
9. L. Juhász, B. Parditka, S. S. Shenouda, M. Kadoi, K. Fukunaga, Z. Erdélyi, Cs. Cserhádi: Morphological and in situ local refractive index change induced tuning of the optical properties of titania coated porous gold nanoparticles. *Journal of Applied Physics* 128 (2020) 054303.

A generációs problémák oka

A kommunikációs problémák nagy részét – szerintünk – a generációk közti különbség okozza. Ha ennek körülményeit jobban megismerjük-megértjük, áthidalhatóvá válik a szakadék és a kommunikáció javulni fog.

A *Baby Boomers generáció*: akik 1940–59 között születtek, a mai vezető réteg legnagyobb részét adják. Életüket jelentősen meghatározta a szocializmus, a teljesítményelv, a szabályok és a munka tisztelete.

Az *X generáció*: a mai 40–60 évesek – 1960 és 1979 között születtek – generációját jelenti. Számítógépet használnak, de többségük ragaszkodik a kézíráshoz, illetve e-mail helyett inkább telefonál. Képesek a megújulásra és alkalmazkodásra, megfelelő társadalmi pozíciót, jövedelmet és státuszt szeretnének elérni.

Az *Y generáció*: akik 1980 és 1995 között születtek. A csoportra jellemző a „technológiaörület”. Nem ter-