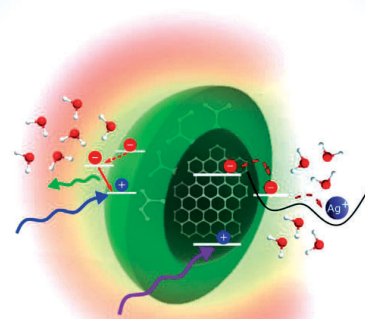


Bélafine Bakó Katalin

■ Pannon Egyetem, Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutató Csoport

belafine.bako.katalin@mk.uni-pannon.hu

Szén nanopöttyök



Bevezetés

A szénelapú anyagok fontos szerepet játszanak az iparban: a tradicionális, ipari szenektől (aktív szén, grafitok) a szénszálakon és szénszál kompozitokon át az újabb szén nanoanyagokig (grafén, egy- és többretegű nanocsövek). Más, tudományos nézőpontból és szigorúan a szerkezeti felépítést tekintve négy különféle csoportba oszthatók ezek az anyagok: gyémánt, fullerén, grafén és nanocsövek [1]. E csoportokhoz csatlakozik a szén nanopöttyök családja.

A szén nanopöttyök (*carbon nano dots*) vagy kvantumpontok (*quantum dots*) olyan szén nanoanyagok, amelyek mérete kisebb, mint 10 nm. (Sokszor a CD (*carbon dots*) rövidítést használják a publikációkban, ami nem összekeverendő a *compact disc* (CD) fogalmával...)

Xu és társai véletlenül fedezték fel a szén nanopöttyöket 2004-ben, amikor egyrétegű nanocsövecskék tisztításával foglalkoztak [2], és fluoreszkáló nanorészecskéknek nevezték őket. A szén (kvantum- vagy nano-) pöttyök (*carbon quantum/nano dots*) elnevezést csak később, 2006-ban Sun és munkatársai kezdték használni [3], hogy meg lehessen különböztetni ezeket az anyagokat más, szintén szénelapú, de alapvetően eltérő felépítésű szén (nano)szerkezetektől.

A nanopöttyök „kvázinulla” kiterjedésű anyagoknak tekinthetők [4, 5], s kedvező tulajdonságaiknak köszönhetően nagy figyelmet keltettek az utóbbi időszakban. A szén nanopöttyöket a fluoreszkáló anyagok családjának vadonatúj, kvantumméretű tagjaként tartják számon.

A szén nanopöttyök előállítása

A szén nanopöttyök alapvetően kétféle módon állíthatók elő: ún. „top-down” vagy „bottom-up” módszerrel. Ezek a nanotechnológiában sokszor használt terminusok arra a stratégiára utalnak, amelynek segítségével nanoanyagokat lehet előállítani. A terminusokat először a Foresight Institute, egy San Franciscóban működő nonprofit kutatóintézet kezdte használni 1989-ben [6]. Míg a „top-down” eljárásnál nagyobb strukturákból kiindulva fokozatosan csökkentik az anyag méretét (széttörik), addig a „bottom-up” technikánál éppen fordítva: apró prekursorokból kiindulva építik fel a szerkezetet.

A „top-down” eljárásnál grafitból, grafénből, szénszálakból, szén nanocsövekből indulnak ki, s a fragmentálást lézeres technikával, illetve elektrokémiai módszerekkel viszik véghez. Zhao és munkatársai [7] például többfalú szén nanocsöveket növesztettek egy indigószerű papíron, amelyeket elektrolitot tartalmazó elektrokémiai cellába helyeztek. Ennek eredményeként a nanocsövek feldarabolódtak.

A „bottom-up” eljárásokat először 2008-ban alkalmazták szén nanopöttyök előállítására [8] Bourlinos és munkatársai, akik a

kémiai szintézis útját követték. Ennél az eljárásnál kisméretű prekursorok: szénhidrátok, polimerek, savak stb. használhatók a szintézishez a legkülönbözőbb technikák segítségével, ahol oligomerek és keresztkötések kialakulásán át vezet az út a szén nanopöttyök eléréséig. Zhu és kollégái [9] például polietilén-glikolból indultak ki, és mikrohullámú besugárzást használtak. Stachowska és csapata [10] citromsav és karbamid elegyét alkalmazta, és pirólízissel dolgozott. De lézerezellel kiváltott hőssokk- és hidrotémális eljárások is szóba jöhetnek... [4, 5]. Fawaz és munkatársai [11] fólsvadlatból, lúggal és termális kezeléssel állítottak elő nanopöttyöket, és dialízissel tisztították őket.

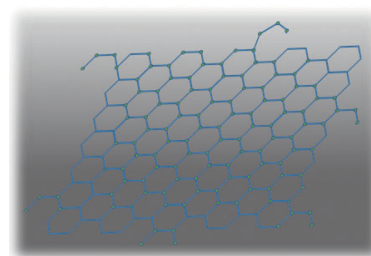
A szén nanopöttyök előállításánál sokszor a felületet is módosítják [12] (pl. funkciós csoportok bevitelével), így az adott anyag tulajdonságait is változtatni, „hangolni” lehet.

Csoportosítás

A szén nanopöttyök felépítésük szerint három csoportba oszthatók [4, 13]:

- grafén kvantumpontok (*graphene quantum dots, GQDs*)
- szén kvantumpontok (*carbon quantum dots, CODs*)
- szenesített polimer pontok (*carbonized polymer dots, CPDs*)

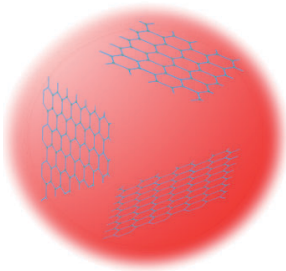
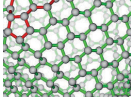
Ezek a szerkezetek képződésük módjában, mikro/nanostrukturájukban és tulajdonságaikban is különböznek. A grafén kvantumpontok (**1. ábra**) egy- vagy néhány rétegű grafit szerkezettel rendelkeznek, s általában „top-down” eljárással állítják őket elő darabolással. Szerkezetük így anizotróp, egyik dimenziójuk (hossz) nagyobb, mint a másik kettő (szélesség, magasság), s felszínükhöz vagy a rétegek közé funkciós csoportok köthetők, amelyek módosíthatják tulajdonságaikat.



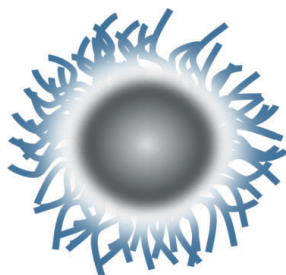
1. ábra.
Grafén kvantumpont szerkezete

Egyes szakirodalmak szerint a grafén kvantumpontok mellett megkülönböztethetők az ún. grafit szén-nitrid kvantumpontok (*graphitic carbon nitride quantum dots, g-CNQD*) [13], amelyek a grafén kvantumpontok analógjainak tekinthetők, de nitrogént tartalmaznak.

A szén kvantumpontok (**2. ábra**) és a szenesített polimer pontok (**3. ábra**) gömb alakúak, és főként a „bottom-up” módszerrel lehet előállítani őket [13], kisebb molekulákból, polimerekből, sőt akár biomasszából is. A szén kvantumpontok belsejében



2. ábra. Szén kvantum pont felépítése



3. ábra. Szénített polimer pont szerkezete

többrétegű, nagy széntartalmú, egymáshoz kapcsolódó kristályos réteg, rács található.

A szenesített polimer pontok polimer-hibrid nanoszerkezetet mutatnak. Előállításuk során a prekursorok kezelésénél először polimerizáció játszódik le, keresztkötések alakulnak ki [13], és a szerkezet kissé merevebbé válik. Közben egy szimultán szenesedési folyamat is érzékelhető, s ahogy a reakcióidő és -hőfok növekszik, a polimer struktúrák fokozatosan gyengülnek, a szenesedési folyamat erősödik, ami együtt jár egy mag megjelenésével (s növekedésével) a szén nanopötty közepén.

Tulajdonságok

A szén nanopöttyök általános jellemzője, hogy erős abszorpciót mutatnak [4] az ultraibolya tartományban (200–400 nm) és erősen, fényesen fluoreszkálnak. A legtöbb esetben kék, illetve zöld fényt bocsátanak ki, de a legújabb kutatások már vörös, sőt közeli infravörös emissziót is demonstráltak. Az egyik fontos kutatási irány, hogy minél keskenyebb sávú emissziót lehessen megvalósítani, s ebben valószínűleg kulcsszerepe van a szén nanopöttyök alaptulajdonságainak, amilyen például a tisztasági fok vagy az egységes méreteloszlás.

A szobahőmérsékleten érzékelhető foszforeszkálás [4] egyes szén nanopöttyök másik vonzó tulajdonsága. Ehhez természetesen megfelelő alapanyagokból (pl. polivinil-alkohol) kiinduló szintézismódszert kell alkalmazni.

Ezeket a lumineszcenciás tulajdonságok igen sok helyen felhasználhatók, ráadásul anyagaink további kedvező tulajdonságokkal is rendelkeznek: jó stabilitás és konduktivitás, biokompatibilitás, alacsony toxicitás, környezetbarát karakter. A fotolumineszcencia mellett kemi- és elektrolumineszcencia jelensége is előfordul a szén nanopöttyöknél [13], amelyek tovább bővíthetik az alkalmazások körét.

Alkalmazások

A szén nanopöttyök alkalmazási lehetősége meglehetősen széles körű már most is, felfedezésük után két évtizeddel. Fluoreszcens és biokompatibilis tulajdonságuknak köszönhetően a nagy felbontású *biológiai képalkotásban (bioimaging)* játszhatnak fontos szerepet [14]. Szén nanopöttyöket tartalmazó oldatot injektálva

egy élő testbe in vivo képet kaphatunk a belső folyamatokról, például detektálási, diagnosztikai célokból.

Szintén jelentős felhasználási lehetőség a *szenzorika*. Jin és munkatársai számoltak be először arról, hogy Fe^{3+} -ionokat detektáltak szén nanopöttyök segítségével már 2012-ben, majd később további fémionok, hidrogénion, anionok és más molekulák meghatározására is alkalmazták őket [15].

Az említett felhasználási területeken rendkívül fontos, hogy a szén nanopöttyök *diszperziós* tulajdonságaival is tisztában legyünk. Sok beszámolóban „vízoldható”, illetve „olajban oldható” szén nanopöttyökről számolnak be [4], de ez így nem pontos terminológia. Igazából ezek az anyagok kolloid formában léteznek, ezért inkább hidrofíll, hidrofób, illetve amfifil tulajdonságúnak nevezhetjük őket attól függően, hogy (főként) milyen funkcionális csoportok találhatók a felületükön. Amennyiben ezek például $-OH$ vagy $-COOH$ csoportok, akkor egyértelműen hidrofíll részecskéről van szó. A diszperziós tulajdonságokat természetesen az előállítási körülmények is erősen befolyásolják.

A szén nanopöttyök gyógyszerek, hatóanyagok kontrollált célba juttatásánál (*controlled release*) is használhatók [16]. A hatóanyagok mellett a hatóanyagok fluoreszcens nyomkövetése is megoldható a segítségükkel. A mikrobiális üzemanyagcelláknál az elektrodok szén nanopöttyökkel történő módosításával jelentős hatékonyságnövekedés érhető el [21].

Sokféle szén nanopötty képes különböző hullámhosszúságú fényt elnyelésére, s így alkalmazhatóak *fotokatalitikus* [17] technológiákban, ahol például különféle szennyezők lebontásánál lehet szerepük. De vizsgálatok folynak napelemek, szuperkondenzátorok, tölthető elemek és egyéb *energetikai célú* alkalmazási esetekben is.

Összefoglaló értékelés

A fluoreszkáló szén nanopöttyök felfedezésük óta amolyan „hot spot” kutatási területté váltak világszerte, s igen széles kutatói érdeklődést váltottak ki [18, 19, 20]. Rendkívül széles és ígéretes felhasználási területük anyagmérnöki forradalmat ígér. Összeállításmat egy idézettel zárom – a szénalapú anyagoknál maradván –, ami talán pontosan jelzi ezeknek az anyagoknak a fontosságát [13]: „Végül, de nem utolsósorban úgy hisszük, hogy a szén nanopöttyök fejlődése jelentős hatással lesz az anyagtudomány evolúciójára éppúgy, mint a graféné!”

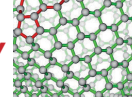


Köszönetnyilvánítás

Készült az RRF-2.3.1-21-2022-00014 azonosítójú „Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium létrehozása” elnevezésű projektben a Magyarország Helyreállítási és Ellenálló képességi Tervének keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenálló képességi Eszközének támogatásával.

IRODALOM

- [1] Maduraiveeran, G., Jin, W.: Carbon nanomaterials: Synthesis, properties and applications in electrochemical sensors and energy conversion systems. *Materials Science and Engineering: B* (2021) 272, 115341.
- [2] Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H.J., Gearheart, L., Raker, K., Scrivens, W.A.: Electrophoretic Analysis and Purification of Fluorescent Single-Walled Carbon Nano-tube Fragments. *J. Am. Chem. Soc.* (2004) 126(40), 12736–7.
- [3] Sun, Y.P., Zhou, B., Lin, Y., Wang, W., Shiral Fernando, K.A., Pathak, P., Mezziani, M.J., Harruff, B.A., Wang, X., Wang, H., Luo, P.G., Yang, H., Kose, M.E., Chen, B., Veca, L.M., Xie, S.Y.: Quantum-Sized Carbon Dots for Bright and Colorful Photoluminescence. *J. Am. Chem. Soc.* (2006) 128, 7756–7757.
- [4] Liu, J., Li, R., Yang, B.: Carbon dots: a new type of carbon-based nanomaterial with wide applications. *ACS Cent. Sci.* (2020) 6, 2179–2195.
- [5] Wang, Y., Hu, A.: Carbon quantum dots: Synthesis, properties and applications. *J. Mat. Chem. C.* (2014) 2(34), 6921–39.
- [6] Drexler, K.E., Peterson, C.: Nanotechnology and Enabling Technologies. *Foresight Briefing No. 2*, 1989.



- [7] Zhou, J., Booker, C., Li, R., Zhou, X., Sham, T.K., Sun, X., Ding, Z.: An Electrochemical Avenue to Blue Luminescent Nanocrystals from Multiwalled Carbon Nanotubes (MWCNTs). *J. Am. Chem. Soc.* (2007) 129(4), 744–5.
- [8] Bourninos, A. B., Stassinopoulos, A., Anglos, D., Zboril, R., Karakassides, D., Gianelis, E.P.: Surface functionalized carbogenic quantum dots. *Small* (2008) 4, 455–458.
- [9] Zhu, H., Wang, X., Li, Y., Wang, Z., Yang, F., Yang, X.: Microwave synthesis of fluorescent carbon nanoparticles with electrochemiluminescence properties. *Chem. Comm.* (2009) 34, 5118–20.
- [10] Stachowska, J.D., Murphy, A., Mellor, C., Fernandes, D., Gibbons, E.N., Krysmann, M.J., Kellarakis, A., Burgaz, E., Moore, J., Yeates, S.G.: A rich gallery of carbon dots based photoluminescent suspensions and powders derived by citric acid/urea. *Sci. Reports*, (2021) 11(1). doi:10.1038/s41598-021-89984-w. PMC 8131706
- [11] Fawaz, W., Hasian, J., Alghoraibi, I.: Synthesis and physicochemical characterization of carbon quantum dots produced from folic acid. *Scientific Reports* (2023) 13, 18641.
- [12] Zeng, Q., Feng, T., Tao, S., Zhu, S., Yang, B.: Precursor-dependent structural diversity in luminescent carbonized polymer dots (CPDs): the nomenclature. *Light: Science & Applications* (2021) 10, 142.
- [13] Li, S., Li, L., Tu, H., Zhang, H., Silvester, D.S., Banks, C.E., Zo, G., Hou, H., Ji, X.: The development of carbon dots: From the perspective of materials chemistry. *Materials Today* (2021) 51, 188–207.
- [14] Wang, B., Cai, H., Waterhouse, G.I.N., Qu, X., Yang, B., Lu, S.: Carbon Dots in Bioimaging, Biosensing and Therapeutics: A Comprehensive Review. *Small Sci.* (2022) 2, 2200012.
- [15] Wang, D., Wang, L., Dong, X., Shi, Z., Jin, J.: Chemically tailoring graphene oxides into fluorescent nanosheets for Fe³⁺ ion detection. *Carbon* (2012) 50(6), 2147–2154.
- [16] Kaurav, H., Verma, D., Vermal, D., Bansal, A., Kapoor, D.N., Sheth, S.: Progress in drug delivery and diagnostic applications of carbon dots: a systematic review. *Front. Chem.* (2023) 11, 1227843.
- [17] Fernando, K. A. Shiral, B., Sahu, S., Liu, Y., Lewis, W.K., Gulianti, E.A., Jafariyan, A., Wang, P., Bunker, C.E., Sun, Y.P.: Carbon Quantum Dots and Applications in Photocatalytic Energy Conversion. *ACS Applied Materials & Interfaces* (2015) 7(16), 8363–76.
- [18] Kottam, N., Smrithi, S. P.: Luminescent carbon nanodots: Current prospects on synthesis, properties and sensing applications. *Methods Appl. Fluoresc.* (2021) 9, 012001.
- [19] Mintz, K.J., Bartoli, M., Rovere, M., Zhou, Y., Hettiarachchi, S.D., Paudyal, S., Chen, J., Domena, J.B., Liyanage, P.Y., Sampson, R., Khadka, D., Pandey, R.R., Huang, S., Chusuei, C.C., Tagliaferro, A., Leblanc, R.M.: A deep investigation into the structure of carbon dots. *Carbon* (2021) 173, 433–447.
- [20] Sivasankarapillai, V.S., Kirthi, A.V., Akksadha, M., Indu, S., Dharshini, U.D., Pushpamalar, J., Karthik, L.: Recent advancements in the applications of carbon nanodots: exploring the rising star of nanotechnology. *Nanoscale Adv.* 2020 (2) 760.
- [21] Loukanov, A., Angelov, A., Takahashi, Y., Nikolov, I., Nakabayashi, S.: Carbon nanodots chelated with metal ions as efficient electrocatalysts for enhancing performance of microbial fuel cell based on sulfate reducing bacteria. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (2019) 574, 52–61.

Az irodalomgyűjtés lezárva: 2025. január 2.

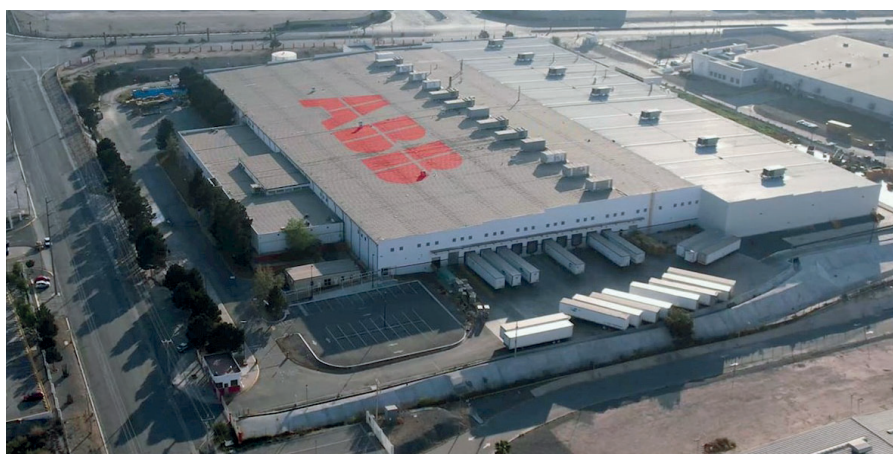
Az ABB mexikói gyártóüzeme két év alatt 80 százalékkal csökkentette a teljes károsanyag-kibocsátást

Az ABB technológiai vezető szerepet tölt be az energetika és az automatizálás területén. Mérnöki és digitalizációs szakértelmének összekapcsolásával segít az iparágaknak abban, hogy nagy teljesítményt érjenek el, miközben hatékonyabbá, termelékenyebbé és fenntarthatóbbá válnak, és így túlszárnyalják korábbi termelési eredményeiket. A vállalat több mint 140 éves múltat tekint vissza, világszerte több mint 105 000 alkalmazottat foglalkoztat. Magyarországi vállalata, az ABB Kft. 1991-ben alakult, azóta az egyik vezető szállítóként van jelen a hazai közmű-, valamint energetikai szektorban.

Az ABB a mexikói Saltillóban található, terhelési központokat és biztonsági kapcsolókat gyártó üzeme az elmúlt két évben 80 százalékkal csökkentette a károsanyag-kibocsátást. A legfrissebb adatok azt mutatják, hogy a telephely szén-dioxid-egyenértékben számítva több mint 5200 tonnával csökkentette a károsanyag-kibocsátást a 2022-es bázisidőszakhoz képest.

Az okosépület-technológia és a fotovoltai (PV) rendszer bevezetése jelentősen hozzájárult a szén-dioxid-kibocsátás mintegy 80 százalékos csökkentéséhez, köszönhetően a helyszínen napenergiából előállított villamos energiának, a zöldenergia-beszerzések integrálásának és az energia-termelékenység optimalizálásának.

Az üzem az ABB Ability Energy Manager intelligens energiagazdálkodási rendszerrel elemzi az energiafogyasztási mintákat, és valós időben azonosítja az energiafelhasználás optimalizálásának és a hatékonyság javításának módjait, az ener-



giaigény ingadozásának függvényében. Az adatok elemzésén túl a rendszer több mint 1000 napelempanelt integrál a létesítmény energiarendszerébe. A panelek évente 980 MWh-t szolgáltatnak, ami az üzem energiaszükségletének körülbelül 10%-át fedezi, míg a fennmaradó áramigényt mexikói megújuló projektekből szerzik be nemzetközi megújulóenergia-tanúsítványokon (I-REC tanúsítványokon) keresztül. Az elektromos járművek (EV) töltésére szolgáló ABB Terra AC fali gyorsítótelepítés tovább erősíti a telephely fenntartható közlekedés iránti elkötelezettségét.

Az ABB saltillói üzeme 2019-ben kezdte meg fenntarthatósági programját a „Clean Industry” tanúsítvány megszerzésével, amit 2020-ban mozgásérzékelők, LED-es világítás és külső napelemes világítás telepítése követett. Emellett a létesítmény tetőszerkezetébe tetőablakokat építettek be, amelyek kihasználják a napfényt, és a nappali

műszakok alatt szükségtelenné teszik a világítást. A mesterséges megvilágítástól való függőség csökkentése mellett ez jelentős, évi közel 1800 MWh energiamegtakarítást eredményezett.

A víztakarékosság iránti elkötelezettség jegyében a felhasznált víz több mint 60 százalékát (3760 m³) egy helyszíni szennyvíztisztító telepre vezetik. Az üzem a kezelt vizet kertészeti célra hasznosítja. Ezek az intézkedések hozzájárulnak a térség vízhiányának csökkentéséhez.

Az ABB szigorú, tudományosan megalapozott, nettó nulla kibocsátási céljai összhangban állnak a Tudományos Alapú Célok kezdeményezés (Science Based Targets initiative/SBTi) Net-Zero szabvánnyal. A vállalat skálázható programja, a Mission to Zero, magában foglalja az energiatermelést, az energiagazdálkodást, valamint az ipari és kereskedelmi tevékenységekben alkalmazható épületautomatizálását is.