

ÚJ GENERÁCIÓS KVANTUMMIKROSKÓP FEJLESZTÉSE EGY MAGYAR–NÉMET EUREKA-EGYÜTTMŰKÖDÉSBEN

Jegenyés Nikolett¹, Tamási János¹, Gali Ádám¹, Szipőcs Gergely², Kolonics Attila², Szipőcs Róbert^{2,*}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

²R&D Ultrafast Lasers Kft., Budapest

*E-mail: robert.szipocs.rnd@gmail.com

A szilárdtestekben lévő ponthibák kvantumállapotainak szabályozása felhasználható kvantumérzékelők előállítására, amelyek szobahőmérsékleten üzemeltethetők és nanométeres térbeli felbontást biztosítanak. A legígéretesebb ponthiba a gyémántban elhelyezkedő nitrogén-vakancia (NV) centrum, amelynek elektronspinje kvantumérzékelőként alkalmazható elektromos és mágneses mezők detektálására, illetve a környezet hőmérsékletének mérésére. Az NV centrumon alapuló érzékelők laboratóriumi keretek között már működnek, azonban a piacon még nem érhető el olyan berendezés, amely az egyedi NV centrumok tulajdonságain alapulna. A német–magyar EUREKA-projekt¹, amelynek magyar konzorciumi tagjai

Gali Ádám csoportja a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontból és a Szipőcs Róbert által vezetett R&D Ultrafast Lasers Kft. cég, egy ilyen egyedülálló berendezés, egy egyetlen NV centrumra épülő kvantummikroszkóp megvalósítását tűzte ki célul.

¹ Projektazonosító: 2021-17465/NP/BILAT_HU_DE_1, „quNV2.0” Új generációs kvantummikroszkóp projekt



Jegenyés Nikolett, PhD, fizikus, tudományos munkatárs a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetben. PhD fokozatát a Szegedi Tudományegyetemen szerezte, és több évnyi franciaországi kutatómunka után 2020-ban csatlakozott az intézet Elméleti Szilárdtestfizika Osztályához, ahol a Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoport tagja. Tudományterülete a nanogyémántok szincentrumainak tanulmányozása optikai módszerekkel és SiC nanoszerkezetek előállítása.



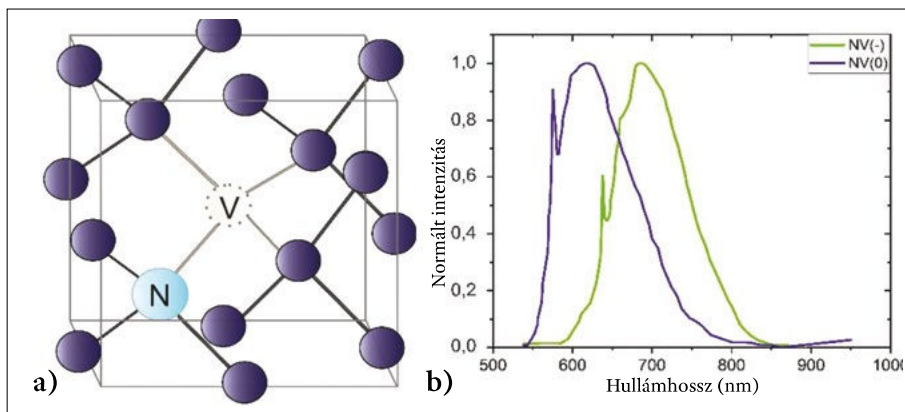
Tamási János, MSc, okleveles gyógyszer-gyógyász-mérnök (BME, MSc), a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont fejlesztőmérnöke. 2019 óta részt vesz a Gali Ádám vezette Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoport különböző ODMR mérőrendszereinek fejlesztésében.



Gali Ádám, PhD, MTA doktora, fizikus, kutatóprofesszor és tudományos igazgató a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetben, a MTA Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoport vezetője, és egyetemi tanár a Budapesti Műszaki és Gazdasági Egyetem Fizikai Intézetében (Atomfizika Tanszék). Fő tudományterülete a ponthibák elméleti és kísérleti spektroszkópiája félvezetőkben, a ponthibaalapú kvantumbitek szakértője. A kvantummikroszkóp kifejlesztésére vállalkozó EUREKA-projektben a magyar partnerek konzorciumvezetője.

A gyémánt a szénatomok tetraéderezes kötéseiből épül fel, amelyek hézagmentesen rendeződve egy háromdimenziós kristályt hoznak létre. A gyémántkristály egy nagyon kemény, átlátszó (a tiltott sáv szélessége 5,5 eV) és egyben nagyon jó hővezető anyag. Ugyanakkor ez a kristálmódosulat hétköznapi körülmények között metastabil a szén méhsejtszerkezetbe (szabályos hatszögek) rendeződő kétdimenziós grafitkristálya mellett, emiatt a szénatomok gyémántkristályba rendeződése tipikusan nagy nyomás és hőmérséklet alatt történik meg. A természetben a földkéregben találhatóak meg ezek a körülmények. A mesterséges gyémánt magas nyomású és magas hőmérsékletű (angol betűszóval HPHT) előállítása ezeket a körülményeket utánozza. Itt a nitrogén egy gyakori szennyező, ami a nyomáscella anyagából kerül be a gyémántba. A kémiai gőzleválasztással (angol betűszóval CVD) előállított gyémántban a nitrogénszennyezés koncentrációját le lehet csökkenteni nagyon kis értékre, amely tiszta gyémántot eredményez. Utóbbi anyagba a nitrogént szabályozottan, egy adott mélységbe lehet bevinni nitrogénion-implantáció segítségével, ahol a nitrogén egy szénatom helyére ül be, kiütve a rácsból az eredeti szénatomot egy kaszkádfolyamat végén, ahol az ionimplantáció során több szénatom is kiesik a helyéről, ahol vakanciák keletkeznek.

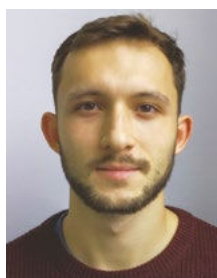
Hőkezelést alkalmazva lehet ezeket a rácshibákat kigyógyítani: 600 °C feletti hőmérsékleten a vakanciák mozogni kezdenek a rácsban (mint a buborékok a vízben), és a nitrogén mellé kerülve létrehozzák a nitro-



1. ábra. a) NV színcentrum a gyémántkristály-rácsban, b) az NV(0) és NV(-) fluoreszcenciaspektruma

gén-vakancia (NV) ponthibát (1a. ábra). Az így kialakult NV ponthiba elsősorban semleges töltésű NV(0) és negatív töltésű NV(-) ponthibaként jelenik meg, ahol a negatív töltést biztosító elektront azok a szubsztitúciós nitrogénhibák adhatják, amelyek mellé nem kerültek vakanciák. Az NV ponthiba energiaszinteket hoz létre a gyémánt tiltott sávjában, és mindkét töltésállapotában a látható fény tartományában fényt bocsát ki megfelelő optikai gerjesztés hatására (1b. ábra). Az NV(0) zérus-fonon-vonala (angol betűszóval: ZPL) 575 nm hullámhossznál, míg az NV(-) ZPL-e 637 nm hullámhossznál jelenik meg. Emiatt is nevezik ezeket a ponthibákat színcentrumoknak, mert az átlátszó gyémántot megszínezik. Ezek a ponthibák paramágnesesek is egyben. Az NV(0) elektronspinje $S = 1/2$, míg az NV(-) hibát a két párosítatlan elektrontól származó $S = 1$ elektronspin jellemzi. Az NV(0) elektronspinjének rácsrelaxációs ideje (ún. T_1 ideje) nagyon rövid, ezzel szemben az NV(-) elektronspinjének T_1 ideje kriogén hőmérsékleten több óra, és szobahőmérsékleten sem csökken milliszekundum alá, emiatt szobahőmérsékleten működő kvantumbitként is szóba jöhet, amelyet érzékeny kvantumszenzorként is lehet használni.

Az NV(-) ponthiba – vagy röviden NV centrum – kvantumszenzorként való hasznosítása terén a kulcs az elektronspin beállítását és kiolvasását lehetővé tevő optikailag detektált mágneses rezonancia (ODMR) jelenség, amelynek elméleti leírását már 1949-ben megalkották [1]. Ugyanakkor az ODMR-jel kimutatása az NV-sokaságra egészen 1987-ig váratott magára [2]. Gruber és munkatársai mutatták be 1997-ben, hogy egy egyedi NV centrum



Szépőcs Gergely, mechatronikai mérnök (Pannon Egyetem, BSc), az R&D Ultrafast Lasers Kft. fejlesztőmérnöke, 2019 óta vesz részt a cég munkájában. Korábbi jelentősebb munkái a cégben: szinkronpumpált optikai parametrikus oszcillátor (OPO) mechanikai tervezése egy európai EuroStar-projekt keretén belül, valamint szálcsatolt szub-ps-os lézerrendszer mechatronikai tervezési és kivitelezési munkái. A cikkben bemutatott Eureka-projekt keretén belül a FLIM konfokális mikroszkópban a FLIM-es kiegészítő egységek mechanikáit tervezte meg, készítette el és építette be a mikroszkópba.



Kolonics Attila, PhD biológusmérnök (BME, MSc), molekuláris biológus (ELTE, PhD), az R&D Ultrafast Lasers Kft. résztulajdonosa. Korábban a bécsi egyetemen kutató immunológiai témakörben posztdoktorként. Ezt követően az N-Gen Kutató Kft. antidiabetikus hatású gyógyszerjelölt molekuláinak hatásmechanizmusát vizsgálta. 2010-től négy évig molekuláris biológusként részt vett egy farmakológiai és orvosi diagnosztikai célra tervezett nemlineáris mikroszkóp fejlesztésében az R&D Ultrafast Lasers Kft. mint konzorciumvezető szakértőjeként. Jelenleg a szelenoproteinek hatásmódját kutatja az Országos Onkológiai Intézetben.



Szépőcs Róbert, PhD, okleveles villamosmérnök (BME, MSc), lézerfizikus (SZTE, PhD), a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, az R&D Ultrafast Lasers Kft. ügyvezetője. A részben Krausz Ferencsel közösen, a femtoszekundumos lézertechnológia fejlesztése területén elért eredményeiért többek között Nemzetközi Gábor Dénes-díjat, Akadémiai Szabadalmi Nívódíjat, az ELFT Bródy Imre-díjat és az MTA Fizikai Tudományok Osztálya Fizikai Díját kapta.