

In situ BOC védőcsoport kialakítása szilícium-karbid nanorészecskéken

CZENE Szabolcs,^{a,*} JEGENYÉS Nikoletta,^b ROHONCZY János,^c BEKE Dávid,^{b,d} és GALI Ádám^{b,e,f}

^aÓbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Népszínház utca 8., 1081, Budapest, Magyarország

^bHUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Konkoly-Thege Miklós út 29-33., 1121 Budapest, Postafiók 49., 1525, Budapest, Magyarország

^cEötvös Loránd Tudományegyetem, Kémiai Intézet, Szervetlen Kémiai Tanszék, Pázmány Péter sétány 1., 1117 Budapest, Magyarország

^dÓbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Bécsi út 94-96., 1081, Budapest, Magyarország

^eBudapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Intézet, Atomfizika Tanszék, Műegyetem rakpart 3., 1111 Budapest, Magyarország

^fMTA-WFK „Lendület” Félvezető Nanoszerkezetek Kutatócsoport, Postafiók 49., 1525, Budapest, Magyarország

1. Bevezetés

A szilícium-karbid (SiC) jól ismert szervetlen vegyület, széles indirekt tiltottsávval. Az anyag polimorfizmust mutat és több mint 200 kristálmódosulatát azonosították^{1,2}. Ezek közül a leggyakoribb a hexagonális és a köbös kristályrácsú módosulata. Előállítására számos módszerrel lehetséges, mint pl. kémiai gőzfázisú leválasztás alkalmazásával (CVD), illetve olyan eljárással amikor elemeiből állítják elő a kristályt magas hőmérsékleten (self propagating high-temperature synthesis; rövidítve SHS)^{2,3}. A SiC rendkívül nagy fizikai és kémiai inertségének, biokompatibilitásának köszönhetően egyre nagyobb figyelmet kap anyagtudományi kutatásokban. Ígéretes anyagnak bizonyul a bioszenzorika terén is, de a kvantumtechnológiában is egyre nagyobb szerepet kap. A rácsban olyan hibahelyeket lehet formálni, amelyeket kvantumbitként lehet hasznosítani⁴. A fluoreszkáló SiC nanorészecskéket szenzorként is használják, ahol méretükből adódóan néhány nanométeres felbontással képesek jellemezni egy anyagot⁵. Azok a SiC nanokristályok, amelyeknek az optikai jelei a felületi funkciók csoportok átmeneteiből származnak 320-360 nm hullámhosszúságú gerjesztés esetén 430-450 nm tartományban emittálnak vizes közegben. A csoportunk által előállított nanorészecskékről már korábban kimutatták, hogy kétfotonos gerjesztéssel *in vitro* markerek lehetnek⁶. Ugyanakkor bizonyos, a nanokristályba beépült ponthibák is fluoreszkálnak, amelyeket emiatt színcentrumoknak⁷ is neveznek. Eredetileg ezt a kifejezést az átlátszó kristályokat „megszínező” fluoreszkáló centrumokra használták, de azóta ezt kiterjesztették az ultraibolya és infravörös tartományban világító centrumokra is, mint pl. az ún. divakancia a SiC-ban⁷.

A részecskék előállítása és egyben funkcionálizálása erősen savas, oxidatív közegben történik (cc. HF/HNO₃ 1:3), így funkciócsoportokban gazdag (pl. -COOH, -OH, -CHO) felület képződik⁸. Ezek a nanorészecskék már önmagukban is alkalmasak arra, hogy biomolekulákat kapcsoljanak

hozzájuk. Az így létrejövő konjugátum C terminális lesz. N terminális származékok szintézisét az irodalomban -NH₂ csoportot tartalmazó vegyületek kapcsolásával végezték^{9,10}. Mindkét terminálás esetében kimutatták már, hogy a funkcionáliszt részecskék nem mérgezőek⁹.

2. Szilícium-karbid nanokristályok kutatása

A Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoportban már hosszú évek óta foglalkoznak nanorészecskék előállításával és felület módosításával^{9,11,12}.

Doktori témám részeként az SiC nanorészecskék amino funkcionálizálását tűztük ki célul. Az irodalomban elsőként SiC nanorészecskéken kivitelezve a Hofmann-degradációt sikerült előállítanunk közvetlenül a felülethez kapcsolódó amino-csoportokat¹³. Ezzel lehetőség nyílt arra, hogy fluoreszcens anyagot kapcsoljunk egy peptidhez, ami így N-terminálisként eltérő receptorokhoz kötődhet a szervezetben. Az amino terminált felületnek a fluoreszcenciára nézve kioltó hatása van^{5,13}. Peptidkapcsolás után viszont a kialakult amidkötéses rendszerben a fluoreszcencia visszatér a kiindulási SiC nanorészecskékhez¹³ hasonló gerjesztési és emissziós maximummal.

Az amino terminált SiC nanorészecskék optikai tulajdonságai mellett azt is fontos megjegyezni, hogy a szabad -NH₂ csoport nem stabil, levegőn állva lassan oxidálódik, illetve oxidálószerekkel -NO₂ csoporttá¹⁴ alakul át. Ebben a cikkben bemutatom azt, hogy az amino terminált SiC nanorészecskék felületének stabilitása érdekében úgy módosítottam a Hofmann degradáció lépéseit, hogy *in situ* BOC (terc-butiloxi-karbonil) védőcsoportot alakítsak ki az SiC nanorészecskék felületén. A módosítás legfontosabb jellemzője az, hogy a védőcsoportot N-brómszukcinimid (NBS) felhasználásával hoztam létre, aminek nagy előnye, hogy könnyebben kezelhető, mint az elemi bróm¹⁵. A védett

* Főszerező. Czene Szabolcs Tel.: +36 1 392 2222 1326 mellék; e-mail: czene.szabolcs@wigner.hun-ren.hu.

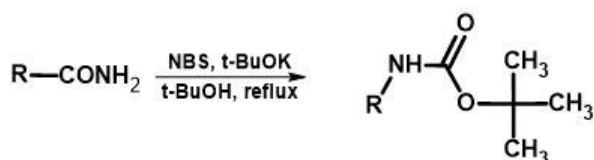
$-NH_2$ származék így szilárd állapotban is tárolható, és sav hatására a védőcsoport könnyen eltávolítható. Az így kialakított SiC nanorészecskék jól fluoreszkálnak és biomarkerként közvetlenül használhatóak.

3. Előállítás

Az NBS, t-BuOK és SiC mennyisége az első táblázatban látható. Első lépésként SiC-ot vizes közegből pároltuk be. A száraz mintát 20 ml $SOCl_2$ -ben szuszpendáltuk újra 50°C ultrahangos fürdőben (1 óra 80 kHz-en és 2 óra 37 kHz-en). Az $SOCl_2$ -t 3 óra után vákuumban 40°C-on eltávolítottuk. A száraz anyaghoz NH_3 dioxános oldatát adtuk (20 ml, 0,25 M). Az amidálás azonos időtartamban és hőmérsékleten történt újraszuszpendálás közben. Az NH_3 /dioxán elegyet vákuumban 50°C-on eltávolítottuk. A módosított Hofmann-degradációhoz 20 ml t-BuOH-ban ultrahangos fürdőben szuszpendáltuk az amid intermediert. Az elegyhez reflux közben első részletben N-bróm-szukcinimidet (NBS) és t-BuOK-t adtunk (1,6 M). Kettő óra refluxoltatás után újabb adag NBS-t adtunk hozzá és még 30 percig refluxoltattuk az elegyet. Ezután a fűtést kikapcsoltuk és a fürdőben keveredve hagytuk kihűlni az elegyet. A lejátszódó reakció egyenlete az 1. ábrán látható.

1. táblázat. A reakciókhoz felhasznált reaktánsok mennyiségei

	SiC (mg)	NBS (mg)	t-BuOK (ml)
A	15	100	9
B	18	100	6
C	54	50	5



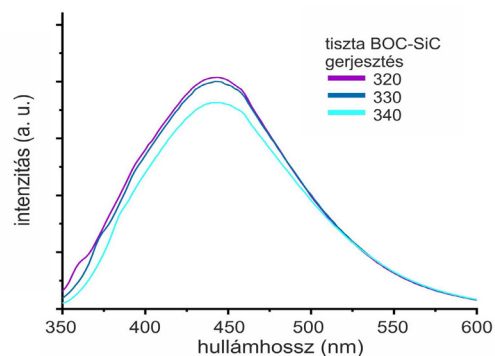
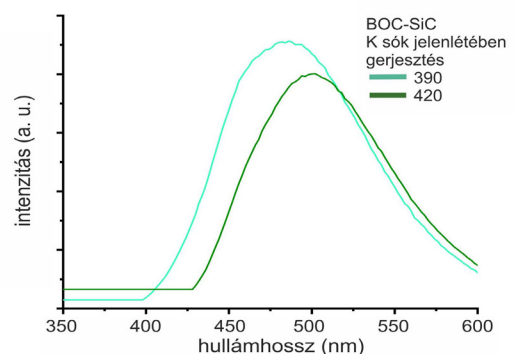
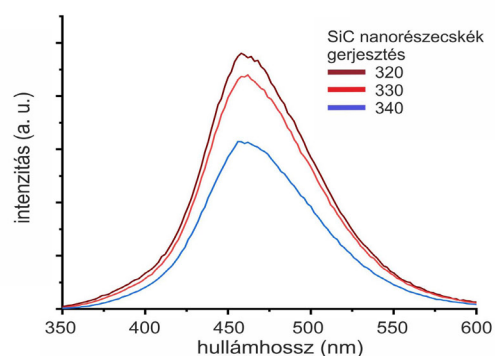
1. ábra. A módosított Hofmann-degradáció

A t-BuOK feleslegét 10 ml vízzel elhidrolizáltuk. Az elegy pH-ját ezután cc. HBF_4 -el hatosra állítottuk be. A kivált csapadékot centrifugálással eltávolítottuk (7000 rpm, 10 perc). Az átlátszó, halvány-barnás elegyet méretkizárásos oszlopkromatográfiával tisztítottuk. Állófázisként Sephadex gélt (Merk KGaA, Darmstadt, Germany—Cytiva G-25), eluensként vizet használtunk. Az A, B eljárásban a töltet magassága 5,5 cm, átmérője 1,4 cm, C reakcióban a magasság 15 cm és átmérője 3 cm volt. Kromatográfia előtt az elegy brómtartalmát ammónia oldattal semmisítettük meg.

4. Eredmények

Az általunk előállított SiC nanorészecskék kisebb méretűek, átlagosan 2-4 nm nagyságúak. Ezek 320-330 nm hullámhosszúságú gerjesztésnél 440-450 nm-nél található emissziós maximummal rendelkeznek^{8,13}. Ez az optikai tulajdonság alkalmas a terméket és mellékterméket tartalmazó frakciók megkülönböztetésére kromatográfia után.

Méretkizárás folytán a nagyméretű és felületmódosított, apolárisabb nanorészecskék a korábbi frakciókban találhatók, míg a polárisabb és kisebb részecskék a későbbiben. Ennek egy érdekes bizonyítéka, hogy a pH 6-os elegy tisztítás utáni későbbi frakcióiban a pH 8-ra nőtt. Ez azzal magyarázható, hogy az óvatos savanyítás hatására a BOC csoport egy része eltávozott, és $-NH_2$ csoportok keletkeztek a felületen. A folyamat során azonban meglepő jelenséget figyeltünk meg: a fotolumineszcencia (PL) spektrumban a gerjesztés és emisszió maximuma jelentős vöröseltolódást mutatott. A gerjesztési maximum 390 nm-re, az emissziós maximum 487 nm-re tolódott, de 420 nm-es hullámhosszúságú fénnel gerjesztve 502 nm-en is jelentős emissziót tapasztaltunk. A részecskék optikai tulajdonságait bemutató spektrumok a 2. ábrán láthatók. A B reakcióban alkalmazott mennyiségekkel tapasztaltuk a legnagyobb mértékű eltolódást.

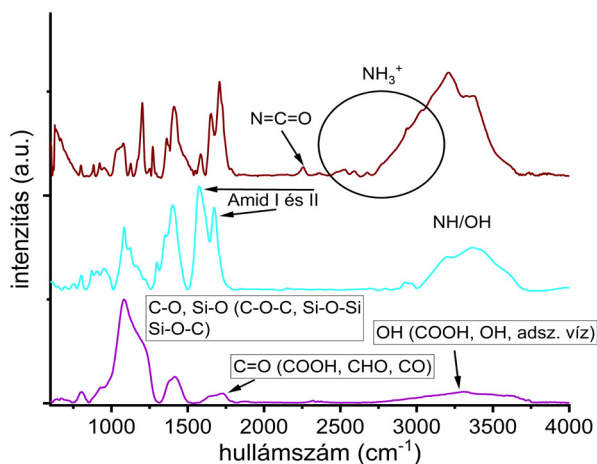


2. ábra. A kiindulási SiC, BOC-SiC KBF_4 -el és a tiszta BOC-SiC minták PL spektruma

Mivel egy kromatográfiás oszlop kapacitása véges, egy bizonyos mennyiség felett az elválasztás hatékonysága csökken. Feltételezhető volt, hogy a savanyítás során keletkezett KBF_4 egyes frakciókban együtt eluálódott a SiC-dal. A só jelenlétét EDS spektroszkópiás elemanalízissel mutattuk ki. A KBF_4 -ről már korábban igazolták, hogy a Fermi-szint és a vegyértéksáv közti energiakülönbséget csökkenti¹⁶. A sók és lehetséges melléktermékek mennyiségének meghatározása, illetve hatásuk pontos ismerete az optikai tulajdonságokra további vizsgálatokat részét képezik.

Miután láttuk, hogy a melléktermékektől az elválasztás nem volt tökéletes, megismételtük a kísérletet nagyobb mennyiségű SiC-t és nagyobb méretű oszlopot használva. A frakciókat UV-VIS spektrumok felvételével is ellenőriztük. Azokat a frakciókat, ahol NBS jelet nem láttuk, azokat egyesítettük, és első lépésként IR spektrumok (3. ábra) felvételével vizsgáltuk a felületmódosítás sikerét.

Szerkezetvizsgálat szempontjából fontos tényező, hogy a funkciós csoportok pontos helyzete nem ismert a felületen, csak jelenlétükre adnak bizonyítékot a mérések. Emiatt az IR és NMR spektrumok elemzése jóval nehezebb, mint szokásos szerves vegyületeket tartalmazó mintákon.

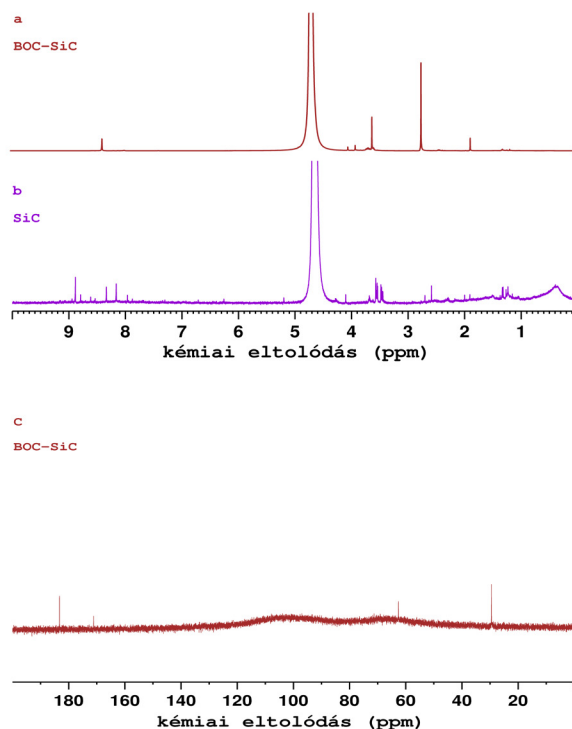


3. ábra. A kiindulási SiC (lila), BOC-SiC (türkizkék) és savkezelte BOC-SiC (barna) IR spektrumai

Kvalitatív elemzéssel megállapítható, hogy a kritikus, sztérikusan gátolt átrendeződési folyamat megtörtént. A BOC-SiC származék spektrumában a 3370 és 3190 cm^{-1} -nél látható sávok szekunder amid NH vegyértékrezgéséhez társíthatók, ami azt sugallja, hogy a felületen található olyan csoportok, ahol asszociáltabb formában van jelen a szekunder NH. Amidok esetében szerkezet azonosításra az Amid I és II-nek nevezett sávok jellemzőek. Mindkettő jól látható 1672 és 1575 cm^{-1} -nél. Mint ismert, a BOC védőcsoport sav hatására lehasítható, így további bizonyítékként 1 M HCl oldatot adtunk feleslegben az elegyhez. A savfelesleg hatására a védőcsoport hasítás után keletkező aminocsoportok protonálódnak, ami lényeges változást jelent a szerkezetben. Az NH_3^+ csoportokra jellemző, hogy 2500 cm^{-1} -től felfelé több csúcsból álló fűrészfogakra emlékeztető sávrendszer jön létre. Ez jól megfigyelhető a savkezelte

mintában. A legintenzívebb sáv (3207 cm^{-1}) bal oldalán több túske jelenik meg. Meg kell jegyezni, hogy nanorészecskéket ajánlatosabb vákuumban mérni, mivel a túl sok adszorbeált vízből származó H kötés rendszer jelentősen torzíthatja a sávok helyzetét, illetve átfedést okozhat¹⁷. Látható, hogy a hasítás utáni hidrolízis nem volt teljes mértékű, mivel az izocianátokra jellemző sáv megjelent 2251 cm^{-1} -nél. Az izocianát forma a Hofmann degradáció során keletkező intermedierek között van jelen¹⁸. Szembetűnő még az 1707 cm^{-1} -nél megjelenő nagy C=O vegyértékrezgés. Mivel ez nem található a BOC származékban, így az nem jelentkezik a NBS feleslegből. Az izocianátok után vizes közegben COOH csoportok alakulnak ki a felületen. Karbonsav dimereiben a C=O csoport vegyértékrezgésére jellemző 1707 cm^{-1} csúcs tűnik fel¹⁹.

További szerkezetvizsgálat céljából NMR spektroszkópiát alkalmaztunk. Azok a csoportok, amelyek jelei IR-ben átfedhetnek, pl. OH, NH_2 , COOH, az NMR spektrumban más tartományban detektálhatók. Emellett BOC védőcsoport esetén az NH_2 helyett CH_3 protonok detektálása jóval könnyebb, hiszen nincs H-D csere az NH_2 és D_2O között^{20,21}. A mintákon felvett ^1H - és ^{13}C -NMR spektrumok a 4. ábrán láthatóak. Megjegyezzük, hogy a SiC származékok mérésére az NMR spektroszkópia korlátozottan alkalmas. Oldat NMR vizsgálatokhoz megfelelő töménységű mintát nem lehet készíteni, mivel már 3 mg/ml esetén is a SiC nanorészecskék gyorsan aggregálnak és kiülepednek, ezért korrelációs spektrumok felvétele nehézkes a minta kis koncentrációja miatt. Ezt a ^{13}C spektrum szemlélteti, amely több mint 43.000 felvételtől készült.



4. ábra. Kémiai eltolódások. a) A BOC-SiC (barna) és b) a kiindulási SiC (lila) ^1H -NMR, illetve c) a BOC-SiC ^{13}C -NMR spektrumai

Mivel a csoportok pontos térbeli helyzetét nem ismerjük, azért bizonyossággal a metilcsoportok beépülését állapíthatjuk meg. A kiindulási SiC nanokristályokhoz képest új jel jelent meg 1,8 ppm-nél, ami a BOC csoportból származhat. Az ennek megfelelő jel a C spektrumban 29,5 ppm-nél látható. A védőcsoport kvaterner szénatomjának 62,6 ppm-nél található NMR csúcsa igazolja, hogy BOC csoport kialakítása sikeres volt.

5. Kísérleti rész

A reakcióhoz szükséges t-BuOK-ot fém kálium és t-BuOH reakciójával, valamint a HBF₄-et HF és bórsav feleslegével állítottuk elő. Az IR mérésekhez Si lapon szárítottuk be a mintákat. A spektrumokat nitrogén áramban mértük (Bruker Tensor 37 FTIR). Az optikai mérések közül az UV spektrumokat Agilent Cary 4000, a PL éréseket Horiba Jobin-Yvon NanoLog FL3-2iHR spektrométeren (450 W Xe lámpa, iHR-320 monokromátor, R928 fotosokszorozó cső). Az NMR spektrumokat a Bruker Avance Neo spectrometer (400 MHz) készülékkel mértük D₂O-ban.

6. Összefoglalás

Korábbi kutatásaink folytatásaként szeretnénk volna megoldani azt a problémát, hogy a szabad aminos csoportok levegőn nem stabilak a biológiai jelzőrendszernek fejlesztett SiC nanorészecskék felületén. Ennek megoldásaként módosított Hofmann-degradáció módszert alkalmaztunk, amellyel BOC védőcsoportokat terveztünk létrehozni. A reakció sikerét IR és NMR mérésekkel támasztottuk alá. PL spektroszkópiás mérésekkel igazoltuk, hogy az amino terminált SiC nanorészecskékre jellemző kioltás nem jelentkezik a BOC védőcsoportokkal fedett SiC nanorészecskéken. A fentiek alapján az így módosított SiC nanorészecskék fluoreszkáló biológiai jelzőrendszerként használhatóak *in vivo* alkalmazásokban.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az MTA Bolyai János Ösztöndíj, UNKP-21 Új Nemzeti Kiválósági Program, a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium keretében a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) 2022-2.1.1-NL-2022-00004 számú támogatásával valósult meg. A jelen cikkben közölt és a részben az ELTE-n végzett kutatást az NKFIH Alap (TKP2021) támogatta, az NKFIH által kiadott támaszoklevél alapján. A Wigner Fizikai Kutatóközpontban folyó kutatást az MTA infrastruktúrája támogatta.

Hivatkozások

1. Abderrazak, H.; Hmida, E. S. B. H.; Abderrazak, H.; Hmida, E. S. B. H. *Properties and Applications of Silicon Carbide*; IntechOpen, 2011.
<https://doi.org/10.5772/15736>
2. Greenwood, N. N. *Az Elemek Kémiaja*; Nemz. Tankvk.; Budapest, 2004; p 31834.
3. Gerhardt, R.; Mukasyan, A. S. *Properties and Applications of Silicon Carbide*; IntechOpen, 2011.
<https://doi.org/10.5772/615>
4. Gali A. *Fizikai Szemle* **2017**, No. 67, 157–162.
5. Dravecz, G.; Jánosi, T. Z.; Beke, D.; Major, D. Á.; Károlyházy, G.; Erostyák, J.; Kamarás, K.; Gali, A. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2018**, 20 (19), 13419–13429.
<https://doi.org/10.1039/C8CP02144A>
6. Beke, D.; Szekrényes, Z.; Pálfi, D.; Róna, G.; Balogh, I.; Maák, P. A.; Katona, G.; Czígány, Z.; Kamarás, K.; Rózsa, B.; Buday, L.; Vértessy, B.; Gali, A. *J. Mater. Res.* **2013**, 28 (2), 205–209.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2012.296>
7. Beke, D.; Valenta, J.; Károlyházy, G.; Lenk, S.; Czígány, Z.; Márkus, B. G.; Kamarás, K.; Simon, F.; Gali, A. *J. Phys. Chem. Lett.* **2020**, 11 (5), 1675–1681.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c00052>
8. Beke, D.; Szekrényes, Z.; Balogh, I.; Czígány, Z.; Kamarás, K.; Gali, A. *J. Mater. Res.* **2013**, 28, 44.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2012.223>
9. Bélinová, T.; Machová, I.; Beke, D.; Fučíková, A.; Gali, A.; Humlová, Z.; Valenta, J.; Hubálek Kalbáčová, M. *Nanomaterials* **2020**, 10 (3), 573.
<https://doi.org/10.3390/nano10030573>
10. Schoell, S. J.; Sachsenhauser, M.; Oliveros, A.; Howgate, J.; Stutzmann, M.; Brandt, M. S.; Frewin, C. L.; Sadow, S. E.; Sharp, I. D. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2013**, 5 (4), 1393–1399.
<https://doi.org/10.1021/am302786n>
11. Beke, D.; Szekrényes, Z.; Balogh, I.; Veres, M.; Fazakas, E.; Varga, L. K.; Kamarás, K.; Czígány, Z.; Gali, A. *Appl. Phys. Lett.* **2011**, 99, 213108.
<https://doi.org/10.1063/1.3663220>
12. Beke, D.; Jánosi, T. Z.; Somogyi, B.; Major, D. Á.; Szekrényes, Z.; Erostyák, J.; Kamarás, K.; Gali, A. *J. Phys. Chem. C* **2016**, 120 (1), 685–691.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b09503>
13. Czene, S.; Jegenyes, N.; Krafcsik, O.; Lenk, S.; Czígány, Z.; Bortel, G.; Kamarás, K.; Rohonczy, J.; Beke, D.; Gali, A. *Nanomaterials* **2023**, 13 (13), 1953.
<https://doi.org/10.3390/nano13131953>
14. Reddy, K. R.; Maheswari, C. U.; Venkateshwar, M.; Kantam, M. L. *Adv. Synth. Catal.* **2009**, 351 (1–2), 93–96.
<https://doi.org/10.1002/adsc.200800641>
15. Jeffrey W. K., Xicai H., *Org. Synth.* **2002**, 78, 234.
<https://doi.org/10.15227/orgsyn.078.0234>
16. Wu, Q.; Hu, T.; Liu, C.; Yu, Y.; Hou, H.; Liu, R.; Zhang, M.; Yu, H. *J. Phys. Chem. C* **2022**, 126 (7), 3375–3384.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c00283>
17. Shenderova, O.; Panich, A. M.; Moseenkov, S.; Hens, S. C.; Kuznetsov, V.; Vieth, H.-M. *J. Phys. Chem. C* **2011**, 115 (39), 19005–19011.
<https://doi.org/10.1021/jp205389m>
18. Aubé, J.; Fehl, C.; Liu, R.; McLeod, M. C.; Motiwala, H. F. *6.15 Comprehensive Organic Synthesis (Second Edition)*; Knochel, P., Ed.; Elsevier: Amsterdam, 2014; pp 598–635.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097742-3.00623-6>
19. Coates, J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*; John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
<https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5606>
20. Koukos, P. I.; Bonvin, A. M. J. J. *Mol. Biol.* **2020**, 432 (9), 2861–2881.
<https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.11.009>
21. Sohár, P. *Mágneses Magrezonancia-Spektroszkópia I* 270–275.; Akadémiai Kiadó, 1976.

In Situ Formation of BOC Protecting Groups on Silicon Carbide Nanoparticles

After successfully forming amino groups directly on the surface of SiC nanoparticles, our research interest turned to addressing the instability of free -NH_2 groups in air. From our previous work, we were convinced that peptide coupling remains stable even after more than one year of storage in solution and in a refrigerator. The formation of a protecting group served several purposes. First, storing the material in solid-state form at room temperature is easier than maintaining it in a solution in a refrigerator. Second, the resulting amide bond system confirms that the recovery of the PL signal in the peptide–SiC conjugate can be attributed to the transformation of the amino-terminated SiC. Third, the preparation using N-bromosuccinimide offers milder conditions compared to the original Hofmann degradation. Since the BOC group can be easily removed by acid, the method is also suitable for generating the -NH_2 group. This is confirmed by the fact that, after acidification to $\text{pH} = 6$, we observed a fraction after chromatography where the pH of the mixture was 8. We examined these fractions using UV–VIS spectroscopy, and no signal corresponding to N-bromosuccinimide was observed in the spectra.

Combining the contents of these fractions, we recorded ^1H and ^{13}C NMR spectra of the reaction product C. Precise NMR and IR analysis relies on proper knowledge of the positions of the functional groups. Based on the proton NMR, methyl groups are evident (1.8 ppm), which also correspond to a signal in the carbon spectrum (62.6 ppm). In the IR spectrum, the BOC derivative shows Amide I and II bands (1672 and 1550 cm^{-1}), which disappear after acid treatment, as well as bands characteristic of isocyanates (2251 cm^{-1}) and protonated amino groups (2500–3200 cm^{-1}), confirming both the formation of the protecting group and the presence of intermediates involved in Hofmann degradation following its removal. Indirect confirmation comes from the PL spectrum, which shows that a clearly measurable signal is obtained again in the amide-bonded system. This provides additional evidence for the potential use of SiC as a fluorescent biomarker when coupled to biomolecules. Compared to dye molecules, nanocrystals offer the advantage of having stable fluorescence, making them suitable for such applications.