ETANOL YORDAMIDA UGLEROD NANONAYLARINI KATALITIK KBCH USULIDA SINTEZ QILISH, RAMAN VA SEM TAHLILI

Muxammadaliyev X.G‘

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Umumiy va noorganik kimyo instituti, Toshkent shahri, Mirzo Ulug‘bek tumani M.Ulug‘bek ko‘chasi, 77a-uy. 100170 Toshkent shahri, O‘zbekiston.

Serobov A.N

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Umumiy va noorganik kimyo instituti, Toshkent shahri, Mirzo Ulug‘bek tumani M.Ulug‘bek ko‘chasi, 77a-uy. 100170 Toshkent shahri, O‘zbekiston.

Yakubov Y.Y

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Umumiy va noorganik kimyo instituti, Toshkent shahri, Mirzo Ulug‘bek tumani M.Ulug‘bek ko‘chasi, 77a-uy. 100170 Toshkent shahri, O‘zbekiston.

Xudoynazarov I.X

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, U.A. Arifov nomidagi ion-plazma va lazer texnologiyalar instituti, Toshkent shahri, Do‘rmon yo’li ko‘chasi 33, 100125 Toshkent shahri, O‘zbekiston.

E-mail: khusanmukhammadaliyev@gamail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada biz uglerod manbai sifatida etanoldan foydalanib, uglerod nanonaylarini sintez qilish uchun kimyoviy bug‘larni cho‘ktirish (KBCh) qurilmasidan foydalanib sintez jarayonini tasvirlaymiz va Si asosli va NiO tagliklarda o‘stirilgan uglerod nanonaylarining SEM turli o‘lcham tasvirlarini baholaymiz. Uglerod nanonaylari Si asosli va NiO tagliklarda 600-750°C haroratda 120 daqiqa davomida etanol oqimi ta’sirida hosil bo‘lishi kuzatildi. Biz kvars Si asosli, nikel oksidi va nikel plastinkalar kabi tagliklarni o‘rganib chiqdik. Katalizatorlar sifatida tegishli atsetatlarning quritilgan etanol eritmalaridan olingan nikel va temir zarrachalaridan foydalanish samaradorligini baholadik. Namunalarimiz Raman spektroskopiyasi hamda skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) yordamida tahlil qilindi.

Kalit so‘zlar: Uglerod nanonaylari; KBCh metod; Nanoo‘lchamli materiallarni tayyorlash va tavsiflash; Raman spektroskopiyasi; skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM)

Аннотация: В данной статье мы описываем процесс синтеза углеродных нанотрубок с использованием установки химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), где в качестве источника углерода применяется этанол, и оцениваем СЭМ-изображения различных размеров углеродных нанотрубок, выращенных на кремниевых и оксид-никелевых подложках. Наблюдалось образование углеродных нанотрубок на кремниевых и оксид-никелевых

подложках при температуре 600-750°C в течение 120 минут под воздействием потока этанола. Мы изучили подложки из кварцевого стекла на основе кремния, оксида никеля и никелевых пластин. Была оценена эффективность использования в качестве катализаторов частиц никеля и железа, полученных из высушенных этанольных растворов соответствующих ацетатов. Наши образцы были проанализированы с помощью рамановской спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Ключевые слова: Углеродные нанотрубки; Метод CVD; Получение и характеризация наноразмерных материалов; Рамановская спектроскопия; сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Abstract: In this article, we describe the synthesis process using a chemical vapor deposition (CVD) device to synthesize carbon nanotubes using ethanol as a carbon source and evaluate SEM images of various sizes of carbon nanotubes grown on Si-based and NiO substrates. It was observed that carbon nanotubes form on Si-based and NiO substrates under the influence of ethanol flow at temperatures of 600-750°C for 120 minutes. We investigated substrates such as quartz-based Si, nickel oxide, and nickel plates. We assessed the effectiveness of using nickel and iron particles obtained from dried ethanol solutions of the corresponding acetates as catalysts. Our samples were analyzed using Raman spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: Carbon nanotubes; CVD method; Preparation and characterization of nanoscale materials; Raman spectroscopy; Scanning electron microscopy (SEM)

Kirish

S. Iijima tomonidan 1991-yilda kashf etilganidan beri uglerod nanonaylari (UNN) o‘zining noyob elektr va mexanik xususiyatlari hamda qo‘llanish imkoniyatlari tufayli keng e’tiborni jalb etib kelmoqda. Uglerod nanonaylari (UNN) bir yoki bir nechta o‘ralgan grafen varaqlaridan tashkil topgan noyob nanostrukturali materiallardir [1]. Alohida ajratilgan UNNlar nanoo‘lchamli qurilmalarni yaratishda asosiy elementlarga aylanishi kutilmoqda [2,3]. Yillar davomida UNN ishlab chiqarishning uchta an’anaviy usuli ishlab chiqildi: lazer ablyatsiyasi [4], yoy razryadi [5] va kimyoviy bug‘larni cho‘ktirish [6] texnikasi. Bular orasida so‘nggi ikkitasi arzon va qo‘llash oson hisoblanadi. Nanoelektron qurilmalarni ishlab chiqarish alohida yoki o‘z-o‘zidan yig‘ilgan nanonaylarni ma’lum nuqtalarda nanometrik aniqlik bilan [3] joylashtirish talab etiladi. Izolyatsiyalangan nanonaylarni yakka-yakka boshqarish orqali buni amalga oshirish deyarli imkonsiz. Eng amaliy yondashuv nanonaylarni ma’lum bir qurilma tuzilmasida belgilangan joylarda sintez qilish va o‘stirishdir. KBCh yuqori tozalikdagi alohida yoki o‘z-o‘zidan yig‘ilgan UNN to‘plamlarini sintez qilish uchun ajoyib usuldir. Tarkibida turli xil uglerod bo‘lgan molekulalar harorat va

ISSN 3030-3907

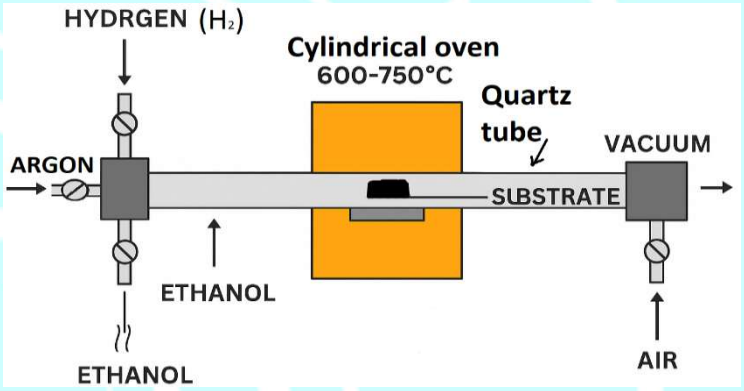
tegishli metall katalizatorning (qo‘llab-quvvatlovchi) birgalikdagi ta’sirida parchalanib, nanonaylar hosil qilish uchun o‘zlarining uglerod atomlarini berishi mumkin. Maruyama, G.Ortega-Sarvents, G.Rueda-Morales. Ortiz-Lopes va boshqalar [7,8,9] yuqori tozalikdagi yakka nanonaylarni sintez qilish uchun oddiy usul haqida xabar berishdi.

Ni/Fe katalizatorlari yordamida KBCh texnologiyasidan foydalanib, spirtdan tayyorlangan bir devorli uglerod nanonaylari (BDUNN). Bu texnologiya yuqori tozalikdagi BDUNNlarni hosil qiladi, chunki parchalangan OH radikallarining uglerod atomlariga ta’siri amorf uglerod, metall zarrachalari va ko‘p devorli nanotrubkalarni samarali yo‘q qilishda juda foydali. Ushbu tadqiqotda biz Maruyama, G.Ortega-Sarvents, G.Rueda-Morales. Ortiz-Lopes va hamkasblariga [7,8,9] o‘xshash jarayon bilan, lekin boshqa turdagi qo‘llab-quvvatlovchi substratlar va katalizatorlardan foydalanib nanonaylar ishlab chiqarilganligi haqida ma’lumot beramiz.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Biz 1-rasmda sxematik tarzda ko‘rsatilgan KBCh qurilmasini keltirdik. Qurilma ikkala uchida vakuum tizimi hamda gazlar va etanol bug‘ini kiritish uchun ulagichlar bilan ta’minlangan (30 mm ichki diametrli) kvars naychadan iborat. Sinab ko‘rilgan substratlar quyidagilar edi: o‘tkazuvchan shisha (Si asosli shisha ustidagi qatlamlari), kvars plastinkalar, nikel oksidi plastinkalar. O‘tkazuvchan shisha, kvars va nikel oksidi uchun katalizator 3:2 atom nisbatidagi Ni:Fe tarkibli Ni va Fe atsetatlarining etanoldagi eritmasidan tayyorlandi. Katalitik eritma ushbu substratlarga tomchilatib va quritish orqali qo‘llanildi. UNNlarning o‘stirilishi jarayoni substratlarni kvars naycha ichiga kiritish bilan boshlanadi, so‘ngra vakuumlash (100 mtorr) va keyinchalik pech harorati taxminan 600-750°C ga ko‘tarilguncha argon gazi oqimi amalga oshiriladi. Pech bu haroratga yetganda, argon oqimi to‘xtatiladi va vakuum yana ulanadi va vakuum nasos ishlayotganda etanol bug‘i klapani ochiladi. Nikel oksidi plastinkalar holatida, etanol klapinini ochishdan oldin vodorod gazi 5-10 daqiqa davomida oqizildi. Pech harorati va etanol ta’sir qilish vaqti bir devorli uglerod nanonaylarning o‘sishi uchun juda muhim omillardir. Agar harorat 600-750 °C dan past bo‘lsa, 30 daqiqalik ta’sir vaqtidan so‘ng bir devorli uglerod nanonaylar hosil bo‘lmaydi. Boshqa tomondan, agar ta’sir vaqti qisqa bo‘lsa, harorat yetarlicha yuqori bo‘lsa ham, hech qanday bir devorli uglerod nanonaylar o‘smaydi. Ushbu jarayonlar bajarilgandan so‘ng, g‘ovakli nikel oksidi tagliklar to‘q qora rangga kiradi, qolganlari esa to‘qroq yoki kulrang tusga kiradi.

ISSN 3030-3907

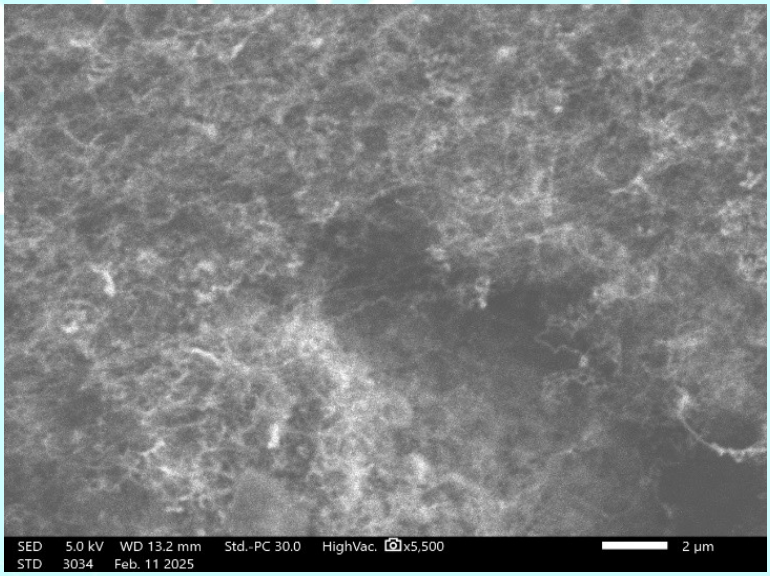


1-rasmda. Etanoldan KBCh usulida UNNlar sintez sxemasi

Skanerlash elektron mikroskop tasvirlari 5 kV kuchlanishda ishlaydigan JSM-IT210LA qurilmasida olindi. Raman spektrlari xona haroratida KBCh usulida sintez qilingan namunalar Raman spektroskopiyasi yordamida Renishaw kompaniyasi ishlab chiqargan asbob asosida tahlil qilindi. O‘lchovlar 532 nm to‘lqin uzunligidagi va 0,1 kVt quvvatdagi lazer nuri yordamida amalga oshirildi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

2-rasmda pech harorati 600-750°C va etanol ta’sir qilish vaqti t_E = 120 daqiqa bo‘lgan o‘tkazuvchan Si asosli taglik ustida o‘stirilgan namunaning tipik skanerlovchi elektron mikroskopiyasi (SEM) ko‘rsatilgan. Nisbatan yirik (w ≈ 2 μm) katalitik zarrachalarga asoslangan, diametri 7-30 nm oralig‘ida va uzunligi bir necha mikrometr bo‘lgan nanonaylarning tartibsiz to‘plami o‘sgan.



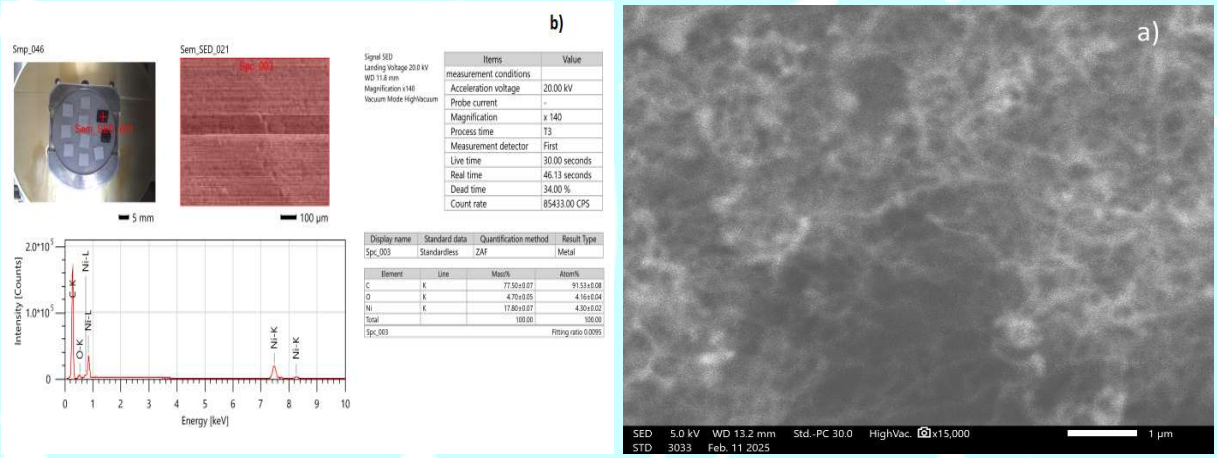
2-rasm. O‘tkazuvchan Si asosli kvarsda o‘stirilgan namunaning SEM tasviri.

Bu uglerod nanonaylar (UNN) xar-hil diametrga ega bo‘lganligi sababli ko‘p devorli nanonaylar (KDUNN) va bir devorli uglerod nanonaylari (BDUNN) aralashmasi ekanligi aniqlandi. Ushbu tagliklarning katalitik zarrachalar o‘lchamini kamaytirish kichikroq diametrli bir devorli nanonalarni sof holatda hosil qilishi kerak.

3a-rasmda 600-750°C va t_E = 40 daqiqa bo‘lgan sharoitda zol-gel usulia tayorlangan nikel , nikel oksidi plastinkasida o‘stirilgan namunaning tipik SEM

ISSN 3030-3907

tasvirini va EDS tasviri ham taqdim etamiz. Ushbu namunada nikel sirtining strukturaviy nuqsonlariga asoslangan egri-bugri nanonaylar to‘plamlari 4,5-30 nm oralig‘idagi diametrlarni ko‘rsatadi. EDS tahlili (3b-rasm) namunada uchta asosiy element: C, O va Ni mavjudligini ko‘rsatdi.



3-rasm. a) Nikel oksidi plastinkasida o‘stirilgan namunaning SEM va b) EDS tasviri

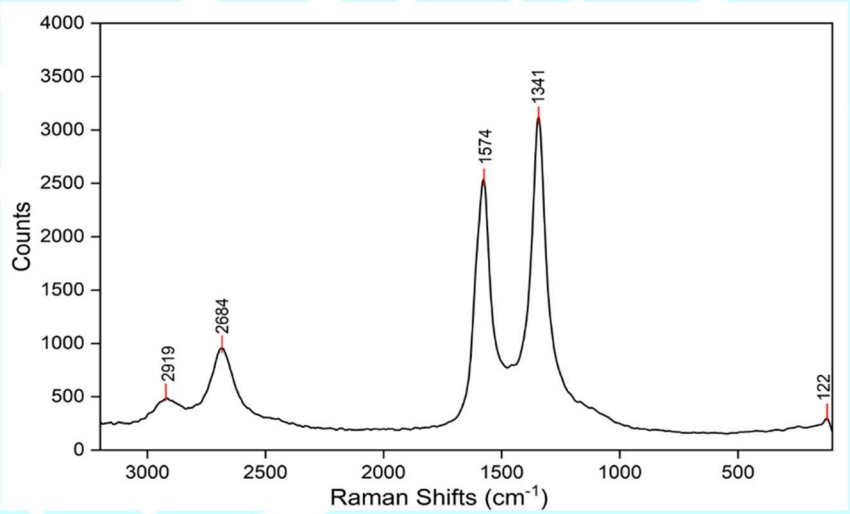
Massaviy tarkib bo‘yicha eng katta ulush uglerod (77.5%)ga to‘g‘ri kelib, bu etanol bug‘idan KBCh jarayonida hosil bo‘lgan uglerod nanonaylarining mavjudligini tasdiqlaydi. Kislorod miqdori (4.7%) asosan zol–gel usulida tayyorlangan NiO tagligi hamda sintezdan keyin yuzada saqlanib qolgan oksidlanish mahsulotlari bilan bog‘liq. Nikel (17.8%) esa katalizator zarrachalarini va taglik materialini ifodalaydi. Natijalar ko‘rsatadiki, NiO asosidagi zol–gel taglikda Ni zarrachalari katalizator sifatida faol bo‘lib, bir devorli uglerod nanonaylar o‘sishi uchun nukleatsiya markazlarini shakllantirgan. Uglerodning yuqori ulushi KBCh jarayonida etanol molekulalarining katalitik parchalanishi hisobiga hosil bo‘lganini ko‘rsatadi. Shuningdek, bu natijalar boshqa tadqiqotlarda ham qayd etilgan. Masalan, Maruyama va hammualliflar tomonidan etanol manbali KBCh usulida bir devorli uglerod nanonaylar sintezida EDS tahlilida uglerod asosiy element sifatida qayd etilgan [10]. Kukovecz va boshqalar esa Ni katalizatorli KBCh jarayonida uglerod (≈70–80 mass%) va kislorodning past miqdori taglikdagi oksid tabiatini ko‘rsatishini aniqlagan [11]. Shuningdek, Zhou va boshqalar NiO asosida tayyorlangan tagliklarda katalizator zarrachalarining bir xil tarqalishi uglerod nanonaylarning morfologiyasi va tozaligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ta’kidlagan [12]. Yaqinda chop etilgan ishda Li va boshqalar ham EDS natijalari asosida uglerodning yuqori konsentratsiyasi bir devorli uglerodli nanonaylarning hosil bo‘lishini tasdiqlaganini qayd etgan [13]

RAMAN SPEKTRLARINI TAXLILI.

Raman spektroskopiyasi RBM, G va D deb ataluvchi uchta spektral sohadagi javobni kuzatish orqali uglerod nanonaylarni (UNN) xarakterlash imkonini beradi. Bu sohalar tegishli tebranish modalarining qo‘zg‘alishiga mos keladi [14,15]. RBM

ISSN 3030-3907

(kengayish–torayish) diapazoni (120–250 sm^{-1}) bir devorli nanonaylar (BDUNN) diametrini aniqlash uchun asosiy diagnostik vosita bo‘lib xizmat qiladi [16]. So‘nggi yillarda bu usul turli muhitlarda BDUNNlarning diametr taqsimlanishi va rezonans effektlarini o‘rganishda keng qo‘llanmoqda [17,18]. G-cho‘qqi (tangensial tebranish) spektri uglerod nanoylarning grafitik tuzilishi, kristallik darajasi va elektron xossalari haqida muhim ma’lumot beradi [19]. Shu bilan birga, D-cho‘qqi (nuqsonlarga sezgir zona) nanonaylar yuzasidagi defektlar, oksidlanish darajasi va funksional guruhlar mavjudligini aniqlashda qo‘llanadi [20]. O‘tkazuvchan shisha ustiga joylashtirilgan namunalarda Raman spektrining G cho‘qqisida turli intensivlikdagi cho‘qqilar kuzatiladi, ammo ular ko‘pincha o‘lchovda noaniqliklar yoki substrat ta’siri bilan bog‘liq bo‘ladi [21].



4-rasm.Etanoldan olingan uglerod nanonaylarining Raman spektiri tasviri.

4-rasmda berilgan Raman spektri KBCh usuli yordamida etanoldan sintez qilingan uglerod nanonaylar uchun olingan. Spektrda xos cho‘qqilar kuzatilgan bo‘lib, ular nanonaychaning kristall tuzilishi va nuqsonlar darajasi haqida muhim ma’lumot beradi. D cho‘qqisi 1341 cm^{-1} chastotada namoyon bo‘lib, turli nuqsonlar, dislokatsiyalar va sp^2 gibridlangan uglerod atomlarining tartibsizligi bilan bog‘liq. Ushbu cho‘qqining mavjudligi nanonaychaning kristall tuzilishida nuqsonlar borligini ko‘rsatadi [22]. G cho‘qqisi 1574 cm^{-1} chastotada bo‘lib, grafitsimon tuzilishga mos keluvchi xos pik hisoblanadi. U sp^2 gibridlangan uglerod atomlarining chiziqli tebranishlarini bildiradi. G-cho‘qqining yuqori intensivligi nanonaylarning grafitlashganligini anglatadi [23]. Nuqsonlar darajasini baholash uchun D va G cho‘qqilarining intensivlik nisbati (I_D/I_G) qo‘llaniladi. Spektrda D-cho‘qqining (1341 cm^{-1}) G-cho‘qqiga (1574 cm^{-1}) nisbatan yuqori intensivligi, KBCh orqali olingan nanonaylarda ma’lum darajada nuqsonlar mavjudligini bildiradi. Shu bilan birga, etanoldan foydalanilganda ko‘pincha nuqsonlar kamroq bo‘lishi adabiyotlarda qayd etilgan [24]. 2684 cm^{-1} chastotadagi cho‘qqi ikkilamchi D′ cho‘qqisi bo‘lib, nanonaychaning grafitsimonligi va qatlamlararo o‘zaro ta’sirlar haqida ma’lumot beradi. Bu cho‘qqi nanonaychaning

ISSN 3030-3907

siqilishi tufayli chastotaning siljishiga ham sabab bo‘lishi mumkin. Cho‘qqining mavjudligi va shakli uglerod nanonaylarning yuqori darajada grafitlashganligini ko‘rsatadi [25]. 2919 cm^{-1} chastotadagi tebranish sohasidagi cho‘qqi esa organik moddalardan qolgan uglevodorod ifloslanishini bildirishi mumkin. Etanol asosidagi KBCh sintezidan keyin bunday cho‘qqining kuzatilishi tabiiy bo‘lib, qo‘shimcha qayta ishlov berish orqali kamaytirilishi mumkin [26]. Past chastotali 122 cm^{-1} cho‘qqi uglerod nanonaylarning radial tebranish rejimi (RBM) bilan bog‘liq bo‘lib, u nanonaychaning diametri haqida ma’lumot beradi. Adabiyotlarga ko‘ra, RBM cho‘qqilari 100–300 cm^{-1} oralig‘ida kuzatiladi va ularning chastotasi nanonaychaning diametriga teskari proportsional hisoblanadi [27].

XULOSALAR:

Biz katalizator sifatida Nikel va temir atsetatlaridan hamda uglerod manbai sifatida etanol bug‘idan foydalangan holda Si asosli va Ni oksidi tagliklaridan foydalanib UNN larni sintez qilish uchun kimyoviy bug‘larni cho‘ktirish (KBCh) qurilmasini optimal sharoitlarini tadqiq qildik va uglerod nanonaylarini sintez qildik. Namunalar analizi skanerlash elektron mikroskopiyasi va Raman spektroskopiyasi yordamida amalga oshirildi va tahlil qilindi. Tadqiqotlarimiz shuni ko‘rsatdiki, substrat harorati va etanol ta’sir qilish vaqti UNN o‘sishi uchun juda muhim parametrlardir. Nikel va temir metall katalizator zarrachalarining o‘lchami nazorat qilinadi, o‘stirilgan UNNlarning diametri, o‘tkazuvchan shisha, nikel oksidi plastinkalar substratlarida UNNlarning muvaffaqiyatli o‘sishiga erishildi. O‘tkazuvchan shishada o‘stirilgan UNNlar 7-30 nm oralig‘idagi katta diametrli ko‘p devorli nanonaylardir; nikel oksidi plastinkalarda o‘stirilganlari 4.5-30 nm diametrli egilgan bir devorli nanonaylardir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YHATI

1. Hughes, K. J., et al. Review of Carbon Nanotube Research and Development: Materials, Synthesis, and Emerging Applications. ACS Applied Nano Materials 7 (2024) 10921–10947. DOI: 10.1021/acsanm.4c02721

2. Dipta, I. K., et al. A Concise Review of Recent Advancements in Carbon Nanotubes. Micromachines 16 (2024) 53. DOI: 10.3390/mi16010053

3. Yahyazadeh, A., et al. Carbon Nanotubes: A Review of Synthesis Methods and Applications. Carbon 5 (2024) 15. DOI: 10.3390/carbon5010005

4. Everhart, B. M., et al. Promoting Effect of Ruthenium on Fe-Catalyzed Growth of Small-Diameter SWCNTs. ACS Omega 9 (2024) 11250–11259. DOI: 10.1021/acsomega.3c09326

5. Shekhar, S., et al. Influence of Ni on Carbon Nanotube Production with Fe-Based Catalysts. Chemical Communications 61 (2025) 2789–2796. DOI: 10.1039/D5CC00045A

ISSN 3030-3907

6. Shiina, S., et al. Synthesis of Ultrahigh-Purity (6,5) Carbon Nanotubes Using a Trimetallic Catalyst. ACS Nano 18 (2024) 765–778. DOI: 10.1021/acsnano.4c01475
7. Yang, S. Y., et al. Unveiling the Role of Metal–Support Interactions in Ni-Based Catalysts for CNT Growth. Applied Catalysis A: General 671 (2025) 119624. DOI: 10.1016/j.apcata.2024.119624
8. Ortega-Sarvents, G., Rueda-Morales, G., Ortiz-Lopes, L. A., et al. Ethanol Chemical Vapor Deposition of SWCNTs Using Ni/Fe Catalysts: Effect of Substrate Support. Journal of Nanomaterials (2023) 1–12. DOI: 10.1155/2023/8856123
9. Ortega-Servantez, G., G. Rueda-Morales va J. Ortiz-Lopes. "Etanol yordamida uglerod nanotubalarini katalitik CVD ishlab chiqarish." Mikroelektronika jurnali 36.3-6 (2005): 495-498.A. Jorio, M.A. Pimenta, A.G. Souza Filho, R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, Yangi J. Fiz. 5 (2003) 139.
10. Maruyama, S., et al. (2002). "Growth process of single-walled carbon nanotubes with a small amount of CO." *Chemical Physics Letters*, 360(3–4), 229–234.
11. Kukovecz, Á., et al. (2005). "Characterization of carbon nanotube powders by EDS, TEM and Raman spectroscopy." *Carbon*, 43(5), 994–1000.
12. Zhou, W., et al. (2019). "NiO catalyst support for the controlled growth of carbon nanotubes by CVD." *Applied Surface Science*, 478, 951–958.
13. Li, H., et al. (2021). "Controlled synthesis of SWCNTs by ethanol-CVD over Ni-based catalysts." *Journal of Materials Science*, 56, 10923–10935.
14. Jorio, A., Dresselhaus, G., & Dresselhaus, M. S. (2003). Carbon Nanotubes: Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications. Springer.
15. Dresselhaus, M. S., et al. (2017). Perspectives on carbon nanotubes Raman spectroscopy. Carbon, 123, 737–750.
16. Popov, V. N. (2016). Curvature effects on phonons in carbon nanotubes: Raman signatures. Physical Review B, 94(8), 085426.
17. Rao, A. M., & Voggu, R. (2018). Resonant Raman scattering from carbon nanotubes. Progress in Materials Science, 95, 42–85.
18. Chen, J., Zhang, Z., & Zhang, Y. (2019). Advances in Raman characterization of carbon nanotubes for composites. Composites Science and Technology, 179, 57–72.
19. Ferrari, A. C., & Basko, D. M. (2020). Raman spectroscopy as a versatile tool for studying graphene and carbon nanotubes. Nature Nanotechnology, 15, 870–880.

ISSN 3030-3907

20. Li, X., & Liu, Z. (2021). Raman spectroscopy for defect and doping analysis in carbon nanotubes. Advanced Functional Materials, 31(12), 2008042.
21. Qian, H., et al. (2023). Substrate influence on Raman spectra of single-walled carbon nanotubes. Nano Research, 16, 1225–1238.
22. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Avouris Ph. Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications. Springer, 2001.
23. Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. Physical Review B, 2000, 61(20): 14095–14107.
24. Maruyama T., Miyauchi Y., Chiashi S., Murakami Y. Single-walled carbon nanotube synthesis using Pt catalysts under low ethanol pressure via cold-wall chemical vapor deposition in high vacuum. Carbon, 2016, 96: 6–13.
25. Jorio A., Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M. S. Characterizing carbon nanotube samples with resonance Raman scattering. New Journal of Physics, 2003, 5(1): 139.
26. Kesavan Pillai, S., & Ray, S. S. (2011). *Epoxy-based carbon nanotubes reinforced composites*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/17062
27. Rao, A. M., Richter, E., Bandow, S., Chase, B., Eklund, P. C., Williams, K. A., & Dresselhaus, M. S. (1997). "Diameter-selective Raman scattering from vibrational modes in carbon nanotubes." *Science*, 275(5297), 187–191. https://doi.org/10.1126/science.275.5297.187

ISSN 3030-3907