

SUV YORDAMIDA CVD USULIDA PAST HARORATDA UGLEROD NANONAYCHALARI SINTEZI.

G'ulomjanova S. G', Xudoyqulov I.X., Abdisaidov I. J., Ashurov X.B.
O'zRFA Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, O'zbekiston, Toshkent sh.
100125, Do'rmon yo'li -33, gulomjanovasevara@gmail.com tel. +998945019925

Annotatsiya. Ni nanokatalizatorlari asosida suv yordamida kimyoviy bug'da cho'ktirish (WA-CVD) usuli bilan uglerod nanonaychalari (UNN) sintez qilindi. TEM tahlillari ularning uzun va egiluvchan morfologiyaga egaligini, Raman spektroskopiyasi esa D-, G- va 2D-chiziqlari orqali tartibsiz va grafitlashgan sohalar mavjudligini ko'rsatdi. XRD natijalari grafit strukturasi va qisman qolgan katalizator zarrachalarini tasdiqladi. WA-CVD usuli katalizator passivatsiyasini oldini olib, UNN uzunligi va grafitlashishini oshiradi, biroq amorf uglerod va qoldiq zarrachalarning saqlanishi kamchilik hisoblanadi. Umuman, WA-CVD yuqori sifatli UNN olish uchun samarali usul bo'lib, uni takomillashtirish uchun qo'shimcha tadqiqotlar zarurligi ko'rsatildi.

Kalit so'zlar: Uglerod nanonaychalari, CVD usuli, Suv yordamida kimyoviy bug' fazasida cho'ktirish (WA-CVD), katalizator, substrat.

СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ МЕТОДОМ CVD С ДОБАВЛЕНИЕМ ВОДЫ

Гуломжанова С. Г., И. Х. Худойкулов, Абдисаидов И. Ж., Ашуров Х. Б.

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,
Узбекистан, г. Ташкент, 100125, ул. Дурмон-йули, 33*

Аннотация. На основе Ni-нанокатализаторов методом химического осаждения из паровой фазы с добавлением воды (WA-CVD) были синтезированы углеродные нанотрубки (УНТ). TEM-анализ показал, что они обладают длинной и гибкой морфологией, а рамановская спектроскопия через D-, G- и 2D-полосы подтвердила наличие как дефектных, так и графитизированных областей. Результаты XRD подтвердили формирование графитовой структуры и частичное сохранение частиц катализатора. Метод WA-CVD предотвращает пассивацию катализатора, увеличивает длину и степень графитизации УНТ, однако недостатком является сохранение аморфного углерода и остаточных частиц. В целом, WA-CVD является эффективным методом получения высококачественных УНТ, но для его совершенствования необходимы дополнительные исследования.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, метод CVD, химическое осаждение из паровой фазы с добавлением воды (WA-CVD), катализатор, подложка.

LOW-TEMPERATURE SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY WATER-ASSISTED CVD METHOD

S. G. Gulomjanova

S. G. Gulomjanova, I. Kh. Khudoyqulov, I. J. Abdisaidov, Kh. B. Ashurov

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, 100125, Durmon Yuli Str., 33

Abstract. Carbon nanotubes (CNTs) were synthesized using the water-assisted chemical vapor deposition (WA-CVD) method based on Ni nanocatalysts. TEM analysis revealed that the CNTs possess a long and flexible morphology, while Raman spectroscopy confirmed the presence of both defective and graphitized regions through the D-, G-, and 2D-bands. XRD results verified the formation of a graphitic structure and the partial retention of catalyst particles. The WA-CVD method prevents catalyst passivation, enhances the length and graphitization of CNTs, but the presence of amorphous carbon and residual particles remains a drawback. Overall, WA-CVD is an effective method for obtaining high-quality CNTs, though further studies are required for its optimization.

Keywords: carbon nanotubes, CVD method, water-assisted chemical vapor deposition (WA-CVD), catalyst, substrate.

Kirish

Uglerod nanonaychalari (UNN) o'zining noyob elektron, mexanik va issiqlik xususiyatlari tufayli eng muhim nanomateriallardan biri sifatida e'tirof etilgan. Kashf etilganidan beri UNNlar nanoelektronika, energiya saqlash, kataliz, kompozitlarni mustahkamlash, suvni tozalash va biotibbiyot qurilmalarida keng o'rganilgan. UNNlarning yuqori elektr o'tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi va katta sirt maydoni ularni yoqilg'i elementlari, sensorlar, superkondensatorlar, sho'r suvni chuchuklashtirish membranalari va kislorod bilan boyitish tizimlarida qo'llash imkonini beradi [1–7].

UNNlarning qo'llanishi ularning sintez jarayonini nazorat qilishga, ya'ni unumdorlik, tartibli joylashuv, tozaligi va morfologiyasini boshqarishga bevosita bog'liq. Elektr yoyi razryadi, lazer ablyatsiyasi, yuqori bosimli uglerod monooksidining (HiPco) disproportsiyalanishi va kimyoviy bug' fazasida cho'ktirish (CVD) kabi usullar orasida aynan CVD usuli eng ko'p imkoniyatlarga ega va nazorat qilinadigan vertikal yo'naltirilgan UNN (VACNT) sintezi uchun istiqbolli deb topilgan [8–11].

Shunga qaramay, VACNT o'sishida asosiy muammolardan biri vaqt o'tishi bilan o'sish tezligining sekinlashishi va oxir-oqibat to'xtashidir. Ayrim tadqiqotlarda o'sish tezligi parabolik tarzda kamayishi qayd etilgan bo'lsa, boshqalar keskin to'xtashini kuzatgan [12]. Bunga asosiy sabab sifatida katalizator zarrachalari yuzasida amorf uglerod qatlami hosil bo'lishi va katalizator

aktivligining yo'qolishi ko'rsatilgan [13]. Shu sababli katalizatorning faolligini saqlash va o'sish jarayonini uzaytirish uchun turli yondashuvlar ishlab chiqilgan.

Eng istiqbolli usullardan biri – o'sish jarayonida kuchsiz oksidlovchilar yoki o'sishni kuchaytiruvchilarni CVD kamerasiga kiritishdir. H_2O , CO_2 , CO , etanol, O_2 va H_2 kabi qo'shimchalar amorf uglerodni katalizator yuzasidan olib tashlab, uning umrini uzaytiradi [14–20]. Muhimi, bunday oksidlovchi moddalar UNN strukturasiga zarar yetkazmasligi kerak. Ular orasida suv bug'i eng samarali ekanligi isbotlangan va Hata va hammualliflari tomonidan ishlab chiqilgan "super-growth" usuli keng qo'llanilmoqda [21]. Bu usul millimetr balandlikdagi, zich joylashgan va deyarli defektsiz UNN o'rmonlarini olish imkonini beradi.

Suv yordamida kimyoviy bug' fazasida cho'ktirish (WA-CVD) jarayonida reaksiya muhitiga nazorat qilingan kichik miqdorda H_2O qo'shilishi katalizatorning umrini uzaytiradi, UNN hosildorligini va tartibli joylashuvini oshiradi [22–25]. Tadqiqotlarda suv qo'shilmagan sharoitda katalizatorning faolligi atigi 1 daqiqa davom etgani, suv qo'shilganda esa 30 daqiqagacha saqlanib qolgani aniqlangan [26]. Bu esa VACNT/katalizator zarrachalari nisbatining 50 000 gacha ortishiga olib keladi – bu ko'rsatkich HiPco jarayoniga qaraganda 100 marta yuqori [27]. Bundan tashqari, suv bug'i katalizatorning qayta ishlatilishiga ham imkon yaratadi.

Yaqinda olib borilgan tadqiqotlar suv bug'ining bir nechta vazifasini ko'rsatdi: u faqat amorf uglerodni tozalabgina qolmay, balki katalizator nanonaychalarining qayta kristallanishini ham sekinlashtiradi. Bu esa zarrachalarning barqarorligini oshiradi va super-baland UNN olish imkonini beradi [28–29].

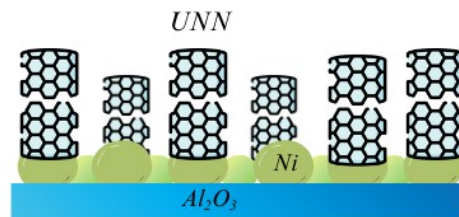
Shu sababli WA-CVD parametrlarini – harorat, uglevodorod/oksidlovchi nisbatini va o'sish vaqtini – optimallashtirish UNN sintezidagi eng muhim masalalardan biridir [30]. Yuqoridagi adabiyotlar tahlilidan farqli o'laroq CVD usulida sintez qilingan UNN katalizator sifatida nikeldan foydalanilgan. Shu bilan birga amorf uglerod ulushining kamayishi hisobiga UNN unumini oshirish amalga oshirildi.

Tadqiqot metodologiyasi.

WA-CVD jarayoni uch asosiy bosqichni o'z ichiga oladi: katalizator/substrat tizimini tayyorlash, uglevodorod va suv bug'ini nazorat ostida kiritish va sintez qilingan CNTlarni xarakterizatsiya qilish.

Katalizator tayyorlash. Tadqiqot ishida katalizator sifatida Ni, substrat sifatida Al_2O_3 tanlab olingan. NiO nanokatalizatorlari zol-gel usulidan sintez qiliindi. Boshlang'ich prekursorlar sifatida Nikel(II) nitrat geksagidrat $[Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ va ammoniy gidroksiddan (NH_4OH) foydalanildi. Zol $85^\circ C$ xapoparda 3 soat vaqt davomida gelga aylantirildi va $400^\circ C$ da kalsinlandi. NiO ni $200^\circ C$ haroratda H_2 muhitida reduksiya yo'li bilan NiO dan metallik Ni nanokatalizatorlari tayyorlandi

O'sish jarayoni. CVD kamerasiga katalizator yotqizilgan substrat joylashtirilgandan so'ng harorat $550^\circ C$ ga yetganda suv bug'i maxsus tizim orqali kichik va nazorat ostida kiritildi. Tadqiqot ishida o'sish vaqti 45 minut davom etdi.



1-rasm. WA-CVD usulida o‘stirilgan UNN larning sxematik ko‘rinishi.

Sintez qilingan uglerod nanonaychalari (UNN) ning strukturaviy, kristallik va morfologik xususiyatlarini baholash uchun bir nechta zamonaviy tahlil usullari qo‘llanildi.

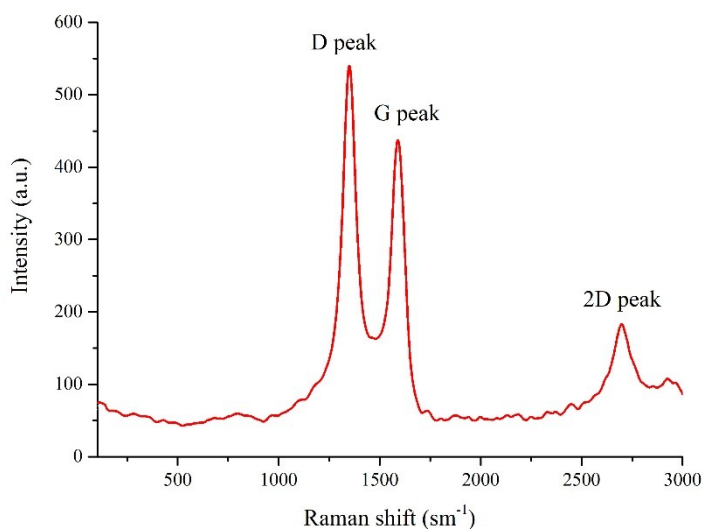
Raman spektroskopiyasi “Renishaw” kompaniyasining 532 nm to‘lqin uzunligiga ega lazer manbali Raman spektrometri yordamida amalga oshirildi. Mazkur tahlil orqali nanonaychalarning grafitlash darajasi, amorf uglerod mavjudligi va struktura ichidagi defektlar to‘g‘risida ma’lumot olindi.

Kristallik tuzilma va fazaviy tarkibni aniqlash maqsadida Rigaku kompaniyasining SmartLab SE-X-ray Diffractometer (XRD) With Guidance Software tizimida rentgen diffraksiyasi (XRD) tahlillari bajarildi. O‘lchovlar 2θ burchak diapazonida olib borilib, UNNning kristall fazalari aniqlandi.

Shuningdek, nanonaychalarning morfologiyasi va ichki tuzilishini yanada chuqurroq o‘rganish maqsadida Thermo Scientific Talos F200i (S)TEM 20-200 kV maydon emissiyasi (skanerlash) transmission elektron mikroskopida tahlillari amalga oshirildi.

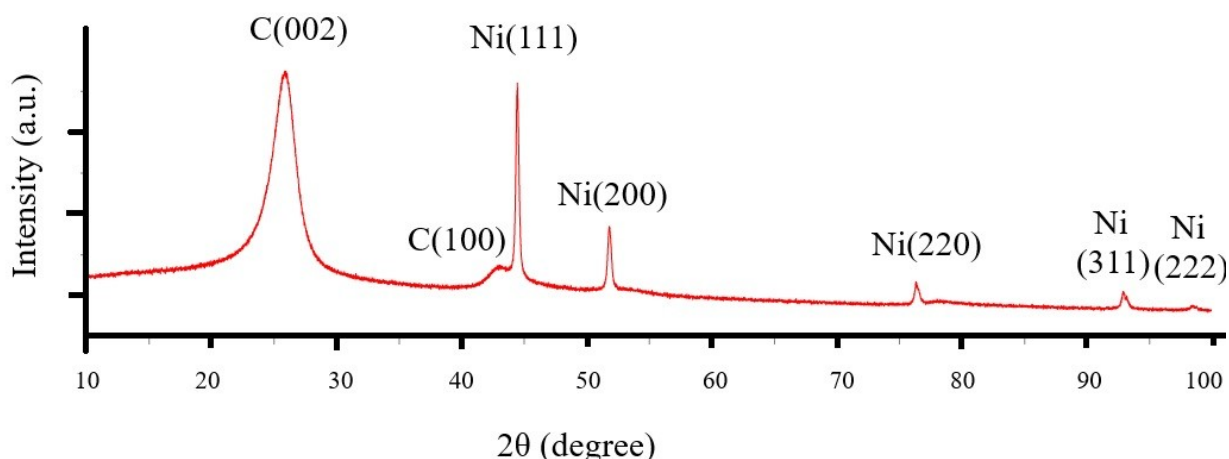
Natijalar va muhokama

Ushbu namunaning Raman natijalari (2-rasm) TEM tahlili bilan uyg‘unlikda bo‘lib, nanonaychalarda uzun ipga o‘xshash grafitik strukturalar bilan birga amorf uglerod fazasi va katalizator qoldiqlarining ham mavjudligini tasdiqlaydi. Umuman olganda, Raman spektri namunada grafitik tuzilma va nuqsonli sohalarning birgalikda mavjudligini ko‘rsatib, hosil bo‘lgan nanostrukturalar uglerod nanonaychalarga xos xususiyatlarga ega ekanini yanada mustahkamlaydi.



2-rasm. WA-CVD usulida o'stirilgan UNN larning Raman spektri.

Ushbu nanonamunaning Raman spektrida 1349 cm^{-1} da D-chiziq, 1586 cm^{-1} da G-chiziq va 2688 cm^{-1} da 2D-chiziq aniqlangan bo'lib, ular uglerod nanomateriallarining grafitik tuzilishi va nuqsonlilik darajasini tavsiflaydi. D-chiziqning intensivligi G-chiziqqa nisbatan ($I_D/I_G \approx 1.25$) nisbatan yuqori qiymatga ega bo'lib, bu nanonaychalarda ma'lum darajada nuqsonlarning mavjudligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, 2D-chiziqning paydo bo'lishi grafitik fazaning rivojlanganligini tasdiqlasa-da, uning nisbatan past intensivligi materialning mukammal grafen qatlamlaridan emas, balki nuqsonli va ko'p devorli uglerod nanonaychalardan tashkil topganini bildiradi.



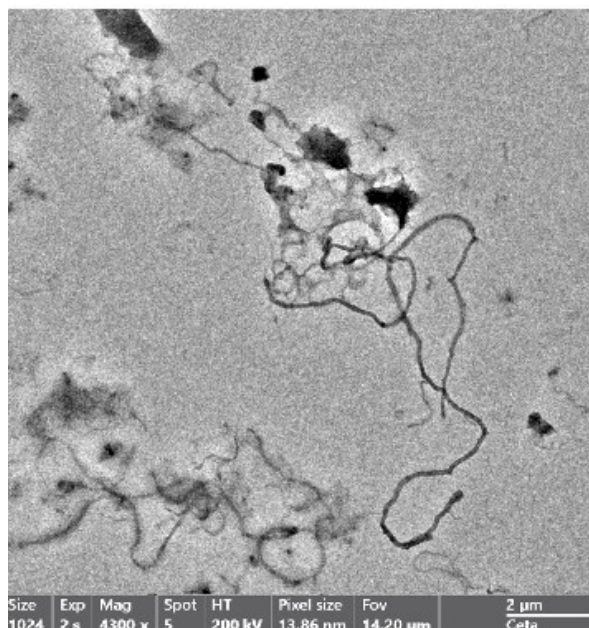
3-rasm. WA-CVD usulida o'stirilgan UNN larning XRD difraktogrammasi.

Namunaning XRD difraktogrammasi $2\theta \approx 26^\circ$ da joylashgan intensiv cho'qqini ko'rsatib, bu (002) tekislikka mos keladi va uglerod nanonaychalari devorining grafitlashgan qatlamlari mavjudligini tasdiqlaydi. Ushbu cho'qqining aniq va keskin ko'rinishi nanonaychalarda grafitlashish darajasining yuqoriligidan dalolat beradi.

Bundan tashqari, difraktogrammada $2\theta \approx 44^\circ$, 52° , 75° va 92° atrofida qo'shimcha cho'qqilar aniqlangan bo'lib, ular mos ravishda Ni(111), Ni(200) hamda yuqori indeksli tekisliklarga tegishlidir. Bu cho'qqilar sintez jarayonida nanonaychalar o'sishini ta'minlagan Ni nanokatalizator zarrachalari namuna tarkibida qisman saqlanib qolganini ko'rsatadi.

Shunday qilib, olingan XRD natijalari Ni nanokatalizatori yordamida uglerod nanonaychalari muvaffaqiyatli o'stirilganini, hosil bo'lgan nanostrukturalarda esa grafitlashgan qatlamlar va qisman saqlanib qolgan metall katalizator zarrachalarining mavjudligini tasdiqlaydi.

4-rasmda 4300 marta kattalashtirishda olingan namunaning TEM tasvirida uglerod nanonaychalarining (CNTs) muvaffaqiyatli sintez qilingani aniqlandi. Nanonaychalar uzun, egiluvchan va ipga o'xshash morfologiyaga ega bo'lib, ular ko'pincha bir-biri bilan chalkashgan holda joylashgan. Bunday struktura ularning yuqori uzunlik/diametr (aspect ratio) nisbatiga egaligini ko'rsatadi.



4-rasm. WA-CVD usulida o'stirilgan UNN larning TEM tasviri.

Shuningdek, tasvirda aniqlangan quyuq kontrastli nuqtalar metall katalizator zarrachalari bo'lib, ular nanonaychalarning uchida yoki ularning yuzasiga yaqin hududlarda joylashgan. Bu holat CVD jarayonida o'sishning asosan "tip-growth" yoki qisman "base-growth" mexanizmlari orqali amalga oshganligini ko'rsatadi. Bundan tashqari, tasvirda amorf uglerodning mavjudligi ham kuzatildi, bu esa uglerod manbaining to'liq kristall strukturaga o'tmaganligini bildiradi. XRD tahlili TEM natijalarini tasdiqlab, nanonaychalarda (002) tekislikka mos grafitlashgan qatlamlarning mavjudligini ko'rsatdi. Shuningdek, Ni(111), Ni(200) va yuqori indeksli cho'qqilarning paydo bo'lishi TEMda aniqlangan katalizator zarrachalarining namunada qisman saqlanib qolganini tasdiqlaydi.

Xulosa

WA-CVD usuli yordamida Ni nanokatalizatori asosida uglerod nanonaychalari muvaffaqiyatli sintez qilindi. TEM tasvirlari nanonaychalarning uzun, egiluvchan va ipga o'xshash morfologiyaga ega bo'lib, yuqori aspect ratio namoyon etishini ko'rsatdi. Nanonaychalarning uchida va yuzasiga yaqin joylarda aniqlangan Ni zarrachalari o'sish jarayonining asosan "tip-growth" mexanizmi orqali kechganini tasdiqladi. Raman tahlilida D-, G- va 2D-chiziqlarning mavjudligi CNTlarda tartibsiz va tartibli grafitlashgan sohalarning birgalikda shakllanganini ko'rsatdi. XRD natijalari esa CNTlarning grafit strukturasi shakllanganini va katalizator zarrachalari qisman saqlanib qolganini tasdiqladi.

WA-CVD usulining afzalligi shundaki, suv bug'lari yordamida katalizator zarrachalarining passivatsiyasi oldi olinadi va nanonaychalarning o'sishi uzoqroq davom etadi, bu esa ularning uzunligi va grafitlashish darajasini oshiradi. Shu bilan birga, bu usulda hosil bo'ladigan amorf uglerod fazasi to'liq bartaraf etilmaydi va katalizator zarrachalari namuna tarkibida qisman saqlanib qolishi kamchilik sifatida qayd etiladi.

Umuman olganda, olingan natijalar WA-CVD usulining yuqori sifatli va grafitlashgan CNTlar olish uchun samarali yondashuv ekanini ko'rsatadi, biroq uni

yanada mukammallashtirish uchun amorf uglerod fazasini kamaytirish va katalizator qoldiqlarini to'liq yo'qotish yo'nalishida qo'shimcha tadqiqotlar zarurligi aniqlandi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Chattopadhyay, D., Galeska, I., & Papadimitrakopoulos, F. (2001). A route for bulk separation of semiconducting from metallic single-wall carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, 123, 9451–9452.
2. Jo, S. H., Tu, Y., Huang, Z. P., Carnahan, D. L., Wang, D. Z., & Ren, Z. F. (2003). Effect of gas composition on the growth of vertically aligned carbon nanotubes using thermal chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 82, 3520–3522.
3. Yildirim, T., & Ciraci, S. (2005). Titanium-decorated carbon nanotubes as a potential high-capacity hydrogen storage medium. *Physical Review Letters*, 94, 175501.
4. Hinds, B. J., Chopra, N., Rantell, T., Andrews, R., Gavalas, V., & Bachas, L. G. (2004). Aligned multiwalled carbon nanotube membranes. *Science*, 303, 62–65.
5. Murakami, Y., Chiashi, S., Miyauchi, Y., Hu, M., Ogura, M., Okubo, T., & Maruyama, S. (2004). Growth of vertically aligned single-walled carbon nanotube films on quartz substrates and their optical anisotropy. *Chemical Physics Letters*, 385, 298–303.
6. Poretzky, A. A., Geohegan, D. B., Jesse, S., Ivanov, I. N., & Eres, G. (2005). In situ measurements and modeling of carbon nanotube array growth kinetics during chemical vapor deposition. *Applied Physics A*, 81, 223–240.
7. Wood, R. F., Pannala, S., Wells, J. C., Poretzky, A. A., & Geohegan, D. B. (2007). Phenomenological model for the super growth of carbon nanotube arrays. *Physical Review B*, 75, 235446.
8. Bower, C., Zhou, O., Zhu, W., Werder, D. J., & Jin, S. (2000). Nucleation and growth of carbon nanotubes by microwave plasma chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 77, 2767–2769.
9. Yoshihara, N., Ago, H., & Tsuji, M. (2007). Effect of hydrogen on the growth of single-walled carbon nanotubes from ethanol by catalytic chemical vapor deposition. *Journal of Physical Chemistry C*, 111, 11577–11582.
10. De los Arcos, T., Vonau, F., Garnier, M. G., & Guggenheim, R. (2002). Carbon nanotube growth on metallic substrates. *Applied Physics Letters*, 80, 2383–2385.
11. Harutyunyan, A. R., Awasthi, N., Jiang, A., et al. (2008). Reduced carbon nanotube–metal catalyst interaction for enhanced carbon nanotube growth. *Physical Review Letters*, 100, 195502.
12. Han, J.-H., Graff, R. A., Welch, B., Marsh, C. P., Franks, R., & Strano, M. S. (2008). Carbon nanotube growth rate differences using various carbon feedstocks and catalyst supports. *ACS Nano*, 2, 53–60.

13. Hata, K., Futaba, D. N., Mizuno, K., Namai, T., Yumura, M., & Iijima, S. (2004). Water-assisted highly efficient synthesis of impurity-free single-walled carbon nanotube forests. *Science*, 306, 1362–1364.
14. Futaba, D. N., Hata, K., Yamada, T., Mizuno, K., Yumura, M., & Iijima, S. (2005). Shape-engineerable and highly densely packed single-walled carbon nanotubes and their application as super-capacitor electrodes. *Physical Review Letters*, 95, 056104.
15. Zhang, G., Mann, D., Zhang, L., et al. (2005). Ultra-high-yield growth of vertical single-walled carbon nanotubes: Hidden roles of hydrogen and oxygen. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 102, 16141–16145.
16. Futaba, D. N., Hata, K., Namai, T., Yamada, T., Mizuno, K., Hayamizu, Y., Yumura, M., & Iijima, S. (2006). 84% catalyst activity of water-assisted growth of single-walled carbon nanotubes. *Journal of Physical Chemistry B*, 110, 8035–8038.
17. Pisana, S., Cantoro, M., Parvez, A., Hofmann, S., Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2007). Growth rate and size-dependent termination of vertically aligned carbon nanotube growth. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 37, 1–5.
18. Sohn, J. I., Choi, C.-J., Lee, S., & Seong, T.-Y. (2002). Effect of Al₂O₃ buffer layer on the growth of vertically aligned carbon nanotubes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 41, 4731–4733.
19. Pint, C. L., Pheasant, S., Nicholas, N., Horton, C., & Hauge, R. (2008). The influence of oxygen and water on super growth of carbon nanotube forests. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8, 6158–6163.
20. Pint, C. L., Xu, Y., Pasquali, M., & Hauge, R. H. (2008). Scaling of water-assisted carbon nanotube forest growth. *ACS Nano*, 2, 1871–1878.
21. Pint, C. L., Pheasant, S. T., Pasquali, M., Coulter, K. E., Schmidt, H. K., & Hauge, R. H. (2008). High-yield synthesis of vertically aligned carbon nanotube forests through controlled water-assisted growth. *Nano Letters*, 8, 1879–1886.
22. Pint, C. L., Nicholas, N., Pheasant, S. T., Duque, J. G., Parra-Vasquez, A. N. G., Eres, G., Pasquali, M., & Hauge, R. H. (2008). The roles of catalyst oxidation and morphology in super growth of carbon nanotube forests. *Journal of Physical Chemistry C*, 112, 14041–14046.
23. Hannon, J. B., Kodambaka, S., Ross, F. M., & Tromp, R. M. (2006). The influence of catalyst-substrate interactions on nanowire growth. *Nature*, 440, 69–71.
24. Amama, P. B., Pint, C. L., McJilton, L., Kim, S. M., Stach, E. A., Murray, P. T., Hauge, R. H., & Maruyama, B. (2009). Role of catalyst-support interactions in water-assisted carbon nanotube growth. *Nano Letters*, 9, 44–49.
25. Endo, M., & Kroto, H. W. (1992). Formation of carbon nanofibers. *Journal of Physical Chemistry*, 96, 6941–6944.

26. Li, W. Z., Xie, S. S., Qian, L. X., et al. (1996). Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes. *Science*, 274, 1701–1703.
27. Dai, H., Rinzler, A. G., Nikolaev, P., & Smalley, R. E. (1996). Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide. *Chemical Physics Letters*, 260, 471–475.
28. Kong, J., Soh, H. T., Cassell, A. M., Quate, C. F., & Dai, H. (1998). Synthesis of individual single-walled carbon nanotubes on patterned silicon wafers. *Nature*, 395, 878–881.
29. Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., & Avouris, P. (2001). *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications*. Springer, Berlin.
30. Ilyos J. Abdisaidov, Sevara G. Gulomjanova, I. Kh. Khudaykulov, X.B. Ashurov, The Low-Temperature Growth of Carbon Nanotubes Using Nickel Catalyst, *East European journal of physics*, Iss: 3, pp 355-358, 2024