

Uglerod nanonaycha olish uchun nikel katalizator qatlamini o'stirish

Rahimov A.A., Zaripov A.A., Adilov M.M., Zoxidov X.X., Rasulqulova D.D

¹O'zRFA Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, O'zbekiston, Toshkent sh. 100125, Do'rmon yo'li -33, raximov011@gmail.com tel. +998998465422

Annotatsiya. Ushbu maqolada yot kirishmalardan holi hamda nano o'lchamli katalizator qatlamini olish kabi dolzarb muammoni hal etish usuli ko'rsatilgan. EB-PVD elektron bug'latish tizimli qurilmasidan foydalanib SiO₂/Si taglik yuzasida nikel bug'lari bir tekis cho'ktirilgan. Ushbu qatlamning AFM mikroskopida olingan tasviridan yuzada bir tekis qatlam olish mumkin ekanligi keltirilgan. EDS spektri tahlili orqali nikel atomlarining juda yupqa qatlam hosil qilgani malum bo'lgan. XRD tahlili nikel yupqa qatlamining fazaviy holatlari o'zgarishi hamda qatlamning tagilikka diffuziyanishi taglik temperaturasiga kuchli bog'langan ekanligi haqida xulosalar aytilgan. EB-PVD usulida yot kirishmalardan holi hamda nano o'lchamdagi katalizator qatlamini olish mumkinligi haqida dalillar keltirilgan.

Kalit so'zlar: Uglerod nanonaychalari, nanokatalizator, elektron nurli bug'latish, temperatura, nanozarra, bug' oqimi, fazaviy o'tish, vakuum, konsentratsiya, nanoqatlam.

Growth of a nickel catalyst layer to obtain carbon nanotubes

Rakhimov A.A., Zaripov A.A., Adilov M.M., Zokhidov X.Kh., Rasulkulova D.D.

¹UzRFA Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan. 100125, Durmon road -33, raximov011@gmail.com tel. +998998465422

Abstract. This article shows a method of solving the actual problem of obtaining a nano-sized catalyst layer free of foreign inclusions. Nickel vapors were evenly deposited on the surface of the SiO₂/Si substrate using the EB-PVD electronic vapor deposition system. From the AFM microscope image of this layer, it is stated that a uniform layer can be obtained on the surface. EDS spectrum analysis revealed that nickel atoms form a very thin layer. XRD analysis concluded that the change of the phase states of the nickel thin layer and the diffusion of the layer into the substrate are strongly related to the temperature of the substrate. Evidence is provided that the EB-PVD method can be used to obtain a nano-sized catalyst layer free of foreign inclusions.

Keywords: Carbon nanotubes, nanocatalyst, electron beam evaporation, temperature, nanoparticle, vapor flow, phase transition, vacuum, concentration, nanolayer.

Выращивание слоя никелевого катализатора для получения углеродных нанотрубок

Рахимов А.А., Зарипов А.А., Адилов М.М., Зохилов Х.Х., Расулкулова Д.Д.

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий УзРФА, Ташкент, Узбекистан. 100125, дорога Дурмон -33, raximov011@gmail.com tel. +998998465422

В данной статье показан способ решения актуальной проблемы получения слоя катализатора, свободного от посторонних включений и имеющего наноразмерное распределение. Пары никеля равномерно наносились на поверхность подложки SiO₂/Si с помощью системы электронного осаждения из паровой фазы EB-PVD. Из изображения этого слоя, полученного с помощью АСМ-микроскопа, видно, что на поверхности можно получить однородный слой. Спектральный анализ ЭДС показал, что атомы никеля образуют очень тонкий слой. Рентгеновский анализ показал, что изменение фазового состояния тонкого слоя никеля и диффузия слоя в подложку сильно связаны с температурой подложки. Приведены доказательства возможности получения методом EB-PVD слоя катализатора без посторонних включений и с наноразмерным распределением.

Ключевые слова: Углеродные нанотрубки, нанокатализатор, электронно-лучевое испарение, температура, наночастица, поток пара, фазовый переход, вакуум, концентрация, нанослой.

I. KIRISH

Uglerod nanonaychalari (UNN) o'zining ajoyib elektr, optik va mexanik xossalari ega ekanligi sababli sanoatning elektronika, materialshunoslik, kimyoviy qayta ishlash va boshqa ko'pgina sohalarida keng qo'llaniladi [1]. Nanonaycha hosil qilish uchun nanokatalizator taglik hosil qilish kerak bo'ladi, ya'ni nanokatalizatorning o'zini olish bu jarayondagi dastlabki bosqich hisoblanadi [2].

Nanokatalizator qatlamini turli tagliklarda o'stirishning eng samarali usullari bir necha xil bo'lib, ular orasida lazerda ishlov berish [3], razryadlardan foydalanish [4], atom qatlam o'stirish [5] va fizik bug'larni cho'ktirish [6] (ingl. PVD) kabilar keng qo'llaniladi. Ammo lazerda ishlov berishda yarimsferik tomchilardan diametri lazerning impulslari soni va qatlam qalinligi orqali boshqarish mumkinligi ushbu usuldan foydalanishni qiyinlashtiradi [7], razryadlardan foydalanish usulida taglik ustiga cho'ktirilayotgan nanozarralar u bilan mustahkam bog' hosil qilolmaydi [8], atom qatlam o'stirish usuli esa metallarni bevosita cho'ktirish imkoniyatini bermaydi [9] elektron nurli bug'latish usulida yuqori vakuum darajasi talab qilingani bilan, taglikka cho'ktirish jarayoni yuqori tozalikda sodir bo'ladi. Shuningdek, ushbu usulda yuqori erish haroratiga ega bo'lgan materiallarni osongina bug'latish imkoniyati ham mavjud [10].

Katalizatorli qatlamli tagliklar nafaqat UNN olishda [11], balki nanotuzilmali materiallarni ishlab chiqishga asoslangan zamonaviy texnologiyalar uchun ham keng qo'llanadi. Xususan, nikel yupqa qatlami ferro-suyuqlik ishlab chiqish texnologiyalarida, bezakli qoplamalarda, yemirilishga qarshi qoplamalarda [12],

nanotexnologiyada [13], quyosh issiqlik almashinish tizimlarida [14] va boshqa sohalarda keng miqyosda ishlatiladi. Xususan nikel va ularning qotishmalari uglerod nanonaychalarning o'sishi uchun eng yaxshi katalizator bo'lib xizmat qiladi. Nikelning katalitik faolligi uning elektron tuzulmasi bilan bog'liq [15].

Uglerod nanonaychalarini o'stirish maqsadida nikel katalizator yupqa qatlamini hosil qilish bo'yicha tadqiqotchilar tomonidan ko'plab izlanishlar olib borilgan. Mualliflar tomonidan Ni katalizator zarralarining Si taglikka yopishishi tekshirildi, izlanishda UNN o'sish jarayoni o'sish rejimi bilan bog'liqligi kuzatilgan [16]. Ammo, dastlabki ishlov berishdan so'ng hosil bo'lgan nanozarra orolchalari oddiy va g'ovakli kremniy taglikka yopishish jarayoni har xil bo'lib, oddiy kremniy taglikda kata o'lchamdagi nanokatalizator zarrachalari shakllangan [17]. MgO (100) da o'stirilgan yupqa Ni qatlamining morfologiyasi qatlam qalinligi bilan kuchli bog'liqlikni ko'rsatadi. Nikel qatlami qalinligi 10 Å bo'lganida taglik yuzasida Ni orollari hosil bo'ladi, qatlam qalinligi ortib borishi bilan bir xil o'lchamdagi nuqtaviy teshiklar paydo bo'ladi va 75 Å qalinlikda teshiklarning davriy taqsimoti hosil bo'lishi ko'rsatilgan [18]. Qalinligi 20 nm bo'lgan titan nitrid qatlami ustida qalinligi 5 nm bo'lgan nikel qatlami vodorod plazmasi bilan oldindan ishlov berishdan so'ng diskret orollarga aylanganligi aniqlangan [19]. SiO₂ taglikda 10 Å qalinlikda o'stirilgan nikel yupqa qatlamiga haroratni ta'siri ko'rib chiqilgan. Natijalar tahlili shuni ko'rsatganki 100-850 K haroratda SiO₂ ustki qatlamida nikel klasterlari shakllangan, 700-1050 K oralig'idagi haroratda Ni ni SiO₂ qatlam orqali Si ga diffuziyasi kuzatilgan va 950-1100 K haroratda SiO₂ desorbsiyalanishi hamda Si ustida faqat Ni₂Si qatlami qolishi aniqlangan [20]. Ni katalizator qatlami va taglik o'rtasida buffer qatlamini to'g'ri tanlash shuningdek, oksidlanish va qaytarilish harorati va vaqtlarini to'g'ri tanlash orqali kerakli o'lchamdagi nanozarrachalar olishda muhim ekanligi aniqlangan [21].

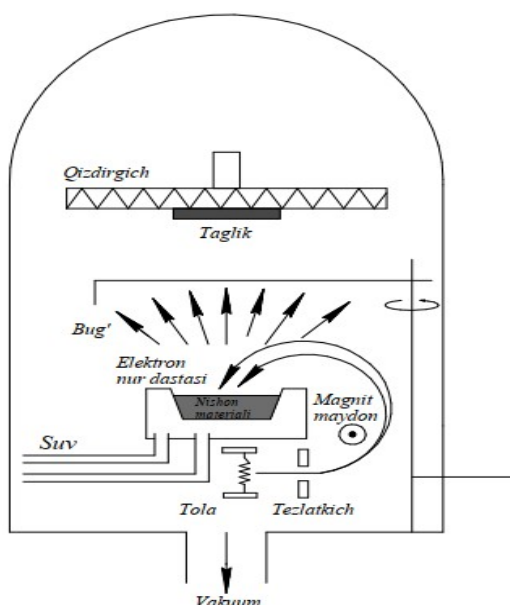
Yuqoridagi tahlillardan ko'rinib turganidek, yot kirishmalardan holi, tegishli oralig'da nano o'lchamdagi taqsimotga ega bo'lgan Ni katalizator qatlamini olish haligacha dolzarb muammo hisoblanadi. Ushbu maqolada mazkur dolzarb muammoni hal qilish EB-PVD usuli yordamida amalga oshirildi.

II. USULLAR

Mazkur ishda nikel katalizator yupqa qatlami elektron nurli bug'latish usuli yordamida o'stirildi. Bu usul boshqa usullarga qaraganda quyidagi afzalliklarga ega. Xususan yuqori darajada boshqariladigan tezligi va yuqori erish nuqtasi bo'lgan metallarni osongina bug'lantirish qobiliyati tufayli yupqa metall plyonkalarni ishlab chiqarishda ommabop usul hisoblanadi. Bundan tashqari bu usul yordamida turli xil materiallarni tez va toza bug'lantish va minimal energiya sarfi bilan yotqizish imkoniyati mavjud. Elektron nurlar dastasi nishon materiallarini 6000 °C gacha qizdirishi mumkin; deyarli barcha umumiy materiallar bu haroratda eriydi so'ngra yuqori tezlikda metall, qotishma, oksid, yarim o'tkazgich va plastmassa tagliklarga yotqizilishi mumkin. Birikmalar uchun cho'kish tezligi taxminan 100 nm / s ni tashkil qiladi, ammo cho'kish tezligi metallar uchun 1 mkm / s ga yetishi mumkin, bu magnit sochilish usuli bilan erishilgan cho'ktirish tezligidan ikki-uch marta kattaroqdir.

Shuningdek elektron nurli dasta tomonidan olingan energiya zichligi qarshilikli isitish manbai tomonidan olingan energiya zichligidan ancha katta [²²].

Bu ishda SEB-06 rusumli elektron bug'latish tizimidan foydalanildi. Qurilma 10 kV gacha tashqi kuchlanish, 600 mA gacha elektron emessiya toki va 6 kW quvvatga ega ishchi parametriga ega. Bundan tashqari suv bilan sovutiladigan mis tigel, taglik tutqichi, qizdirgich va vakuum kamerasi kabi qismlarga ega (1-rasm). Kamerada turbomolekulyar nasos yordamida 10^{-8} tor vakuum hosil qilish imkoniyati mavjud. Yuqori darajadagi vakuum yupqa qatlam o'sishidan oldin sirt ifloslanishini kamaytirishga yordam beradi, shakllanayotgan yupqa qatlamni turli yod kirishmalar dan holi bo'lishga yordam beradi. Instrumental sistemada yupqa qatlam o'stirish jarayoni quyidagicha sodir bo'ladi.



1-rasm. EB-PVD usulida yupqa qatlam o'stirish qurilmasining sxematik ko'rinishi.

Dastlab nishon materiali tigelga joylashtiriladi so'ngra kamera ichida yuqori vakuum hosil qilinadi. Elektron emessiya tokini boshqarish orqali nishon materialini bug' bosimini hamda taglikni qizdirish orqali hosil bo'layotgan qatlamning fazaviy o'zgarishi va strukturasi boshqarish imkoniyati mavjud.

III. MATERIAL

Namuna tayyorlash — Nikel katalizator yupqa qatlamini o'stirish uchun qalinligi 376 mkm va 1x2 sm *n* tipli (111) orientatsiyali kremniy taglik olindi. Kremniy taglikni yuza qatlamidan turli organik birikmalardan tozalash uchun dastavval 55 ° C temperaturali atseton ((CH₃)₂CO) eritmali hamda metanol (CH₃OH) eritmali vannada 15 daqiqa davomida ushlab turildi, so'ngra dionlashgan suvda yuvildi hamda azot muhitida quritildi. Kremniy taglikda oksid qatlami hosil qilish maqsadida SNOL rusumli pechda kremniy taglik kvars naycha ichiga joylashtirildi va 1000 ° C haroratda ikki soat ushlendi. Taglikda hosil bo'lgan oksid qatlam nikel atomlarini kremniy taglikka

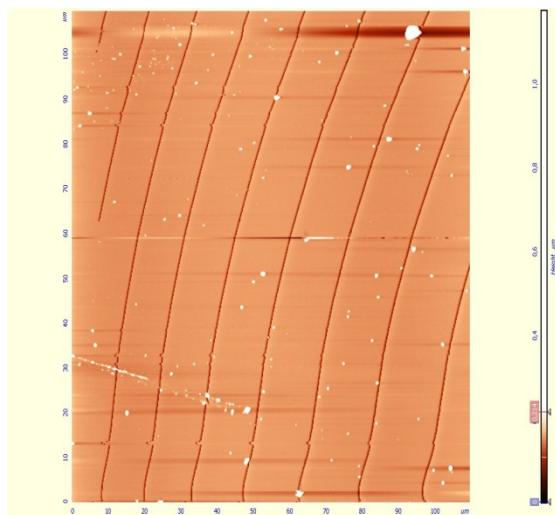
diffuziyasini oldini oladi. Yuqoridagi ishlovlardan so'ng taglik EB-PVD usulida nikel nanokatalizatorini cho'ktirishga tayyor.

Nikelni elektron nurli bug'latish (EB-PVD) yordamida o'stirish. Ni katalizator yupqa qatlamini elektron nurli bug'latish yordamida o'stirishda qalinligi 1 mkm bo'lgan parallelepiped shaklidagi 99% toza nikel dastlab EB-PVD kamerasidagi suv bilan sovutiladigan mis tigelda eritildi. Si (111) plastinasi nishondan 40 sm masofada taglik tutqichiga joylashtirildi. Taglikni bevosita 1000 °C haroratgacha qizdirish imkoniyati mavjud. Yupqa nanostrukturaga ega bo'lgan qatlam o'stirish jarayoni elektron emessiya toki 50 mA, kameradagi vakuum darajasi 10^{-6} Tor va taglik haroratini 400 °C dan o'zgartirmagan holda 10 s davomida olib borildi. So'ngra namuna tekshirish uchun olindi.

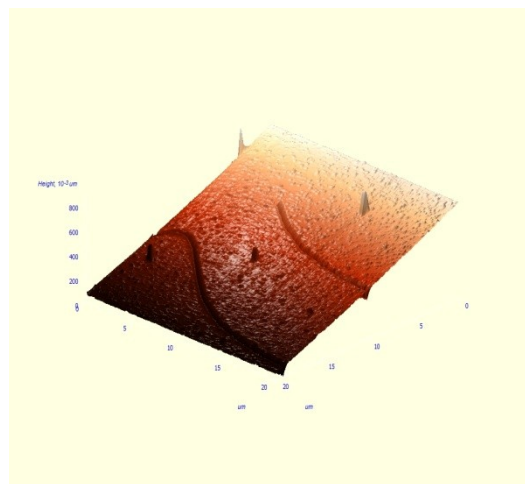
Olingan yupqa qatlamning fazaviy holati Rentgen difraktogrammasi (ing. XRD) yordamida tahlil qilindi. Qatlam sirti morfologiyasi esa atom kuch mikroskopi (ing. AFM) orqali o'rganildi. Tarkibiy tahlillar skanerlovchi elektron mikroskop (ing. SEM) yordamida aniqlandi.

IV. NATIJALAR VA MUHOKAMALAR

Mazkur ishda 60 nm li SiO_2/Si taglikda EB-PVD usuli yordamida nikel yupqa qatlami hosil qilinishining natijalari keltirildi. Olingan katalizator qatlamini topografiyasini tahlil qilish uchun AFM dan foydalanildi. Quyidagi 2a va 2b-rasmda AFM da olingan nikel katalizator qatlami tasviri keltirilgan. AFM tasviri kontakt rejimida xona haroratida olingan.



2a)



2b)

2 a,b-rasm. EB-PVD usuli yordamida SiO_2/Si taglikka cho'ktirilgan nikel yupqa qatlami AFM mikroskopida olingan ikki (a) va uch (b) o'lchamli tasviri.

Ushbu rasmdan nikel qatlam sirtida 7 μN kuch ostida hosil bo'lgan ikkita nov shaklidagi chiziq profili ko'rinib turibdi. Shuningdek, sirtida oq rangli o'lchamlari taxminan 1-3 mkm oralig'ida bo'lgan yot kirishmalarni ko'rishimiz mumkin.

Qatlamning uch o'lchovli tasvirida kirishmalarni piramida shaklda ekanligi hamda sirtning notekisligini kuzatish mumkin. Sirt g'adir-budirligining o'rtacha qiymati $R=2,2$ nm ni tashkil qiladi va bu qiymat o'lchangan sirt yuzasi o'lchamiga bog'liq ravishda turli qiymatga ega bo'lishi mumkin.

EB-PVD usuli yordamida SiO_2/Si taglikka cho'ktirilgan nikel yupqa qatlami AFM mikraskopida olingan tasviridan ma'lum bo'ldiki, ushbu usul taglik yuzasida qisman bir tekis qatlam olish imkoniyatiga ega.

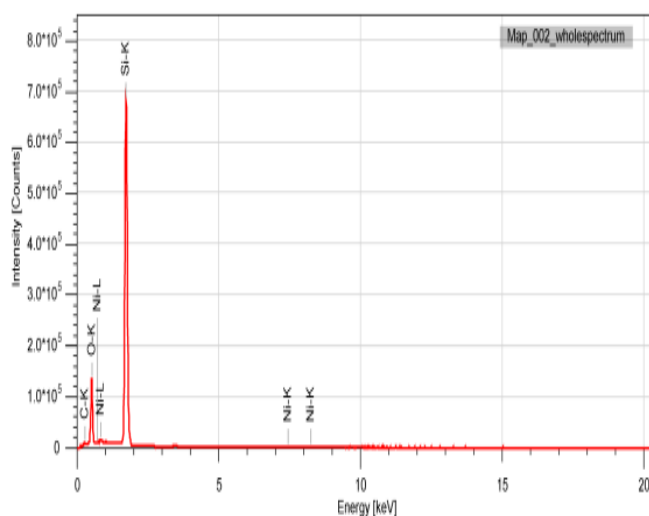
Olingan nikel yupqa qatlami va kremniy oksid qatlami yuzasini solishtirish uchun SEM tasviri olindi (3-rasm). 3a-rasmda nikel qatlami tasviri keltirilgan bo'lib, undagi oq nuqtalar begona kirishmalarni anglatadi.

Mazkur 3a-rasmning qora fon (taglikning cho'ktirish uchun ochiq qoldirilgan) qismida nikel yupqa qatlami hosil bo'lganini visual ko'rish mumkin. Ushbu yupqa qatlamning tarkibiy tahlili 3b-rasmda keltirilgan. Spektr profili qatlamda katta miqdorda kremniy va kislorod hamda kichik miqdorda nikel mavjudligini ko'rsatadi. Bunda Si miqdori 72% ni, O miqdori 24% ni hamda Ni miqdori 4% ni tashkil etadi.

Ma'lumki EDS tahlili uchun yo'naltirilgan nuri taglikning yuza qatlamidan chuqurroqqa kirib, o'sha yetib borgan qism tarkibi haqida ma'lumot beradi. Shuning uchun kremniy va kislorod cho'qqisi nikel cho'qqisiga qaraganda ancha yuqori. Bundan nikel atomlari juda yupqa qatlam hosil qilganini tushunish mumkin.

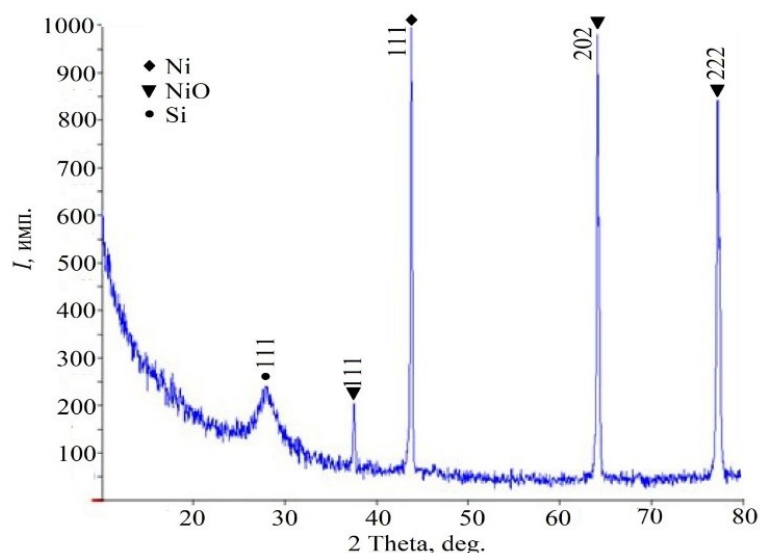


3-rasm. Nikel katalizator qatlamining qatlamining SEM tasviri.



4-rasm Nikel katalizator EDS spektri.

Uglerod nanonaychalari nikel katalizator qatlamida shakllanishi uchun katalizator qatlamining turli nuqsonlardan holi bo'lishi va yaxshi kristallangan bo'lishi kerak.



5-rasm. Nikel katalizator qatlamining XRD difraktogrammasi.

Shuning uchun olingan yupqa qatlamning kristallik holatini aniqlash maqsadida XRD tahlili o'tkazildi. 4-rasmda qatlamning XRD difraktogrammasi keltirilgan.

Diagrammadagi $2\theta = 44.6^\circ$ da (111) Miller indeksli Ni kubik strukturaga mos va $2\theta = 37.3^\circ$, 64.2° , va 79.5° da (111), (200) va (222) kristal orientatsiyaga ega diffraksion cho'qqilar esa kubik kristal strukturali NiO shakllanganini ko'rsatadi. $2\theta = 28.7^\circ$ da mos kelgan diffraksion cho'qqi esa Miller indeksi (111) bo'lgan amorf fazada shakllangan Ni_2Si borligini ko'rsatadi.

XRD tahlili nikel yupqa qatlamining fazaviy holatlari o'zgarishi hamda qatlamning tagilikka diffuziyalanishi taglik temperaturasi kuchli bog'langan ekanligi isbotlandi. Bu bilan qatlamning yupqaligi haqidagi SEM tasviri natijalaridan olingan xulosalar tasdiqlandi. Ushbu maqolada olingan natijalar tahlilli orqali, EB-PVD usuli yordamida nikel yupqa katalizator qatlamini o'stirish imkoniyati ko'rsatildi.

V. XULOSA

SEB-06 rusumli EB-PVD elektron bug'latish tizimli qurilmasi SiO_2/Si taglik yuzasida nikel bug'larini bir tekis cho'ktirish imkonini beradi. Shuningdek kerakli qalinlikdagi va tekis sirt morfologiyasini hosil qilish bug' oqimi, taglik va nishon orasidagi masofa hamda taglik haroratini boshqarish orqali erishish mumkinligi ma'lum bo'ldi. SiO_2/Si taglik yuzasiga cho'ktirilgan nikel yupqa qatlamini AFM mikroskopida olingan tasviridan ushbu usulda taglik yuzasida bir tekis qatlam olish mumkin ekanligi aniqlandi. EDS spektri tahlili nikel atomlarining juda yupqa qatlam hosil qilganini tasdiqladi. XRD tahlili nikel yupqa qatlamining fazaviy holatlari o'zgarishi hamda qatlamning tagilikka diffuziyalanishi taglik temperaturasi kuchli bog'langan bo'lishini tasdiqladi. Shuningdek kremniy taglikda taglik temperaturasi ortishi nikel oksid hosil bo'lishiga olib kelishi ma'lum bo'ldi. Kremniy oksidi tagligida esa oksid qatlamning qalinligi diffusion to'siq vazifasini o'taganligi tufayli bu jarayon kuzatilmadi. EB-PVD usuli yordamida yot kirishmalardan holi hamda nano o'lchamli katalizator qatlamini olish mumkinligi tasdiqlandi.

Adabiyotlar

- ¹. S. Iijima, *Nature* 354 (1991) 56
- ² Yoon, Y. J., Bae, J. C., Baik, H. K., Cho, S., Lee, S. J., Song, K. M., & Myung, N. S. (2002). Growth control of single and multi-walled carbon nanotubes by thin film catalyst. *Chemical physics letters*, 366(1-2), 109-114.
- ³ Song, R. G., Yamaguchi, M., Nishimura, O., & Suzuki, M. (2007). Investigation of metal nanoparticles produced by laser ablation and their catalytic activity. *Applied surface science*, 253(6), 3093-3097.
- ⁴. Patcas, F., & Krysmann, W. (2007). Efficient catalysts with controlled porous structure obtained by anodic oxidation under spark-discharge. *Applied Catalysis A: General*, 316(2), 240-249.
- ⁵. Zhou, K., Huang, J. Q., Zhang, Q., & Wei, F. (2010). Multi-directional growth of aligned carbon nanotubes over catalyst film prepared by atomic layer deposition. *Nanoscale research letters*, 5, 1555-1560.
- ⁶. Krumov, E., Mankov, V., & Starbova, K. (2004). Nanosized columnar microstructure and related properties of electron gun deposited Al₂O₃ thin films. *Vacuum*, 76(2-3), 211-214.
- ⁷. Henley, S. J., Poa, C. H. P., Adikaari, A. A. D. T., Giusca, C. E., Carey, J. D., & Silva, S. R. P. (2004). Excimer laser nanostructuring of nickel thin films for the catalytic growth of carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 84(20), 4035-4037.
- ⁸. Messing, M. E. (2015). The advantages of spark discharge generation for manufacturing of nanoparticles with tailored properties. *Journal of Green Engineering*, 5(3), 83-96.
- ⁹. Oviroh, P. O., Akbarzadeh, R., Pan, D., Coetzee, R. A. M., & Jen, T. C. (2019). New development of atomic layer deposition: processes, methods and applications. *Science and technology of advanced materials*, 20(1), 465-496.
- ¹⁰. Wang, Z., & Zhang, Z. (2016). Electron beam evaporation deposition. *Advanced nano deposition methods*, 33-58.
- ¹¹. Saidin, M. A. R., Aziz, M., & Ismail, A. F. (2009, June). Parametric Studies of Thin Film Nickel Catalyst for the Growth of Carbon Nanotubes. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1136, No. 1, pp. 219-223). American Institute of Physics.
- ¹². Hajihoseini, H., Kateb, M., Ingvarsson, S. P., & Gudmundsson, J. T. (2019). Oblique angle deposition of nickel thin films by high-power impulse magnetron sputtering. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10(1), 1914-1921.
- ¹³. Adsten, M., Joerger, R., Järrendahl, K., & Wäckelgård, E. (2000). Optical characterization of industrially sputtered nickel–nickel oxide solar selective surface. *Solar Energy*, 68(4), 325-328.
- ¹⁴. Pauleau, Y., Kukiela, S., Gulbinski, W., Ortéga, L., & Dub, S. N. (2006). Structure and physical properties of nickel films deposited by microwave plasma-assisted cathodic sputtering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(13), 2803.
- ¹⁵. Esconjauregui, S., Whelan, C. M., & Maex, K. (2009). The reasons why metals catalyze the nucleation and growth of carbon nanotubes and other carbon nanomorphologies. *Carbon*, 47(3), 659-669.
- ¹⁶. Ramana, C. V., Hussain, O. M., Naidu, B. S., & Reddy, P. J. (1997). Spectroscopic characterization of electron-beam evaporated V₂O₅ thin films. *Thin Solid Films*, 305(1-2), 219-226.
- ¹⁷. Patterned aligned growth of carbon nanotubes on porous structure templates using chemical vapor deposition methods Lee, W. Y., Liao, T. X., Juang, Z. Y., & Tsai, C. H. (2004). Patterned aligned growth of carbon nanotubes on porous structure templates using chemical vapor deposition methods. *Diamond and related materials*, 13(4-8), 1232-1236.
- ¹⁸. Potočník, J., Nenadović, M., Jokić, B., Štrbac, S., & Rakočević, Z. L. (2013). Structural characterization of the nickel thin film deposited by glaz technique. *Science of Sintering*, 45(1), 61-67.
- ¹⁹. Ting, J. H., Chang, C. C., Chen, S. L., Lu, D. S., Kung, C. Y., & Huang, F. Y. (2006). Optimization of field emission properties of carbon nanotubes by Taguchi method. *Thin solid films*, 496(2), 299-305.
- ²⁰. Mayer, J. T., Lin, R. F., & Garfunkel, E. (1992). Surface and bulk diffusion of adsorbed nickel on ultrathin thermally grown silicon dioxide. *Surface science*, 265(1-3), 102-110.
- ²¹. Bulyarskiy, S. V., Zenova, E. V., Lakalin, A. V., Molodenskii, M. S., Pavlov, A. A., Tagachenkov, A. M., & Terent'ev, A. V. (2018). Influence of a buffer layer on the formation of a thin-film nickel catalyst for carbon nanotube synthesis. *Technical Physics*, 63, 1834-1839.
- ²² Wang, Z., & Zhang, Z. (2016). Electron beam evaporation deposition. *Advanced nano deposition methods*, 33-58.