



UDK:538.93:538.959

**Shahnozahon MUMINOVA**,  
*Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti dotsenti v.b*  
**Umida ESHDAVLATOVA**,  
*Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti talabasi*  
**Gulrux XUJAMOVA**,  
*Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti talabasi*  
**O'tkir O'LJAYEV**,  
*Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti dotsenti v.b*  
*E-mail:utkir.uljaev@outlook.com*  
**Komil KARIMOV**,  
*Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti talabasi*

*PhD J.Xaqqulov taqrizi asosida*

### BOR KIRITILGAN (8,0)@(17,0) IKKI QAVATLI UGLERODLI NANOTRUBKANING ELEKTR VA ISSIQLIK XUSUSIYATLARI

Аннотация

Ushbu tadqiqotda (8,0)@(17,0) xiralikka ega ikki qavatli uglerodli nanotrubka (IQUNT)larning elektr va issiqlik o'tkazuvchanlik xususiyatlariga bor (B) atomlari kiritilishining ta'siri o'rganildi. Bor atomlari turli konsentratsiyalarda ( $\rho\%$ ) kiritilib, haroratning o'zgarishi sharoitida o'tkazuvchanlik mexanizmlari tahlil qilindi. Kiritilgan atomlar va haroratning o'zgarishi zaryad taqsimlanishi va fonon tarqalishiga ta'sir etib, natijada IQUNTlarning elektr va issiqlik o'tkazuvchanlik samaradorligi sezilarli darajada modifikatsiyalanishi aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** Uglerodli nanotrubka, bor atomlari, konsentratsiya, issiqlik o'tkazuvchanlik, elektr o'tkazuvchanlik, qisman zaryad.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА БОР-ЛЕГИРОВАННОЙ ДВУХСТЕННОЙ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ (8,0)@(17,0)

Аннотация

В данном исследовании было изучено влияние легирования атомами бора (B) на электрические и теплопроводные свойства двухслойных углеродных нанотрубок (ДСУНТ) с хиральностью (8,0)@(17,0). Атомы бора вводились при различных концентрациях ( $\rho\%$ ), и транспортные механизмы анализировались в условиях изменения температуры. Изменение концентрации легирующего элемента и температуры влияет на распределение заряда и рассеяние фононов, в результате чего существенно изменяется эффективность электрической и тепловой проводимости ДСУНТ.

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, атомы бора, концентрация, теплопроводность, электропроводность, парциальные заряд.

### ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF A BORON-DOPED (8,0)@(17,0) DOUBLE-WALLED CARBON NANOTUBE

Annotation

In this study, the effect of boron (B) atom doping on the electrical and thermal transport properties of double-walled carbon nanotubes (DWCNTs) with (8,0)@(17,0) chirality was investigated. Boron atoms were introduced at various concentrations ( $\rho\%$ ), and the transport mechanisms were analyzed under different temperature conditions. Variations in dopant concentration and temperature affect charge distribution and phonon scattering, leading to significant modifications in the electrical and thermal conductivity of the DWCNTs.

**Keywords:** carbon nanotubes, boron atoms, concentration, thermal conductivity, electrical conductivity, partial charge.

**Kirish.** Uglerod nanotrubkalar (UNT) - bu uglerod atomlari (C) dan tashkil topgan, murakkab panjara bo'yicha joylashgan silindrsimon tuzilmalardir. UNTlar Ijima tomonidan kashf etilganidan beri, ular eng ko'p o'rganilgan nanomateriallardan biri hisoblanadi [1]. UNTlarning bir qavatli (BQUNT), ikki qavatli (IQUNT) va ko'p qavatli (KQUNT) turlari mavjud bo'lib, so'nggi yillarda ushbu UNT lar ichida elektron xususiyatlari, xiralik, devorlararo masofa va kimyoviy modifikatsiyalarga juda sezgir bo'lgan IQUNTlardan ko'p va samarali tarzda qo'llanilib kelinmoqda [2].

IQUNT - bu ikkita bir qavatli uglerod nanotrubkalaridan tashkil topgan noyob bir o'lchovli nanostrukturalardir. Bu tizimda ichki va tashqi nanotrubkalar o'zaro zaif van der Waals kuchlari orqali o'zaro ta'sir qiladi, ammo har biri alohida elektron xususiyatini saqlaydi [3,4]. Natijada, IQUNTlar BQUNTlarning ajoyib mexanik qattiqligi, yuqori issiqlik o'tkazuvchanligi va elektron xususiyatlarini saqlab qoladi, shu bilan birga BQUNTlarda bo'lmagan yaxshilangan strukturaviy barqarorlik va qatlamlararo o'zaro ta'sirlarni hosil qiladi [4]. Nanotrubkalarining (BNNT, WS<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, SiNT bir nechta turlari mavjud bo'lib, mikroelektronika, energiya saqlash, quyosh batareyalari, sensorlar, kabi keng qo'llanilish sohalariga ega [5-7]. Ular fizika, kimyo va materialshunoslik kabi sohalarda ham katta qiziqish uyg'otib, elektron qurilmalar, sensorlar, materiallarni mustahkamlash, va boshqa ko'plab sohalarda foydalidir.

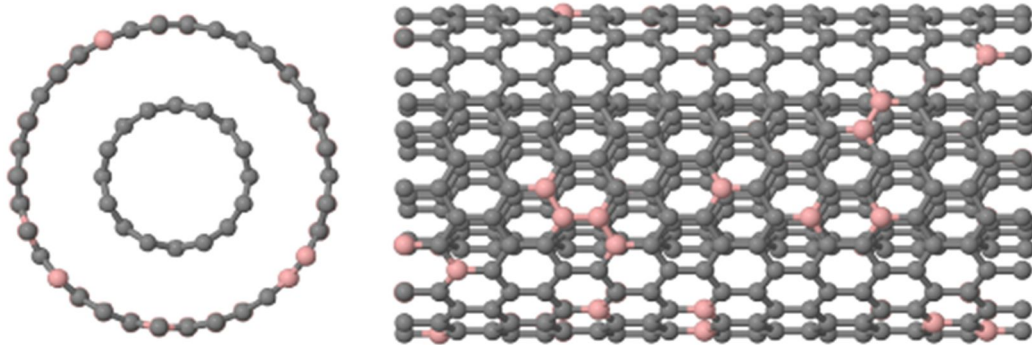
UNTLarni kimyoviy modifikatsiya qilish, ularning strukturaviy, elektron va kimyoviy xususiyatlarini turli xil sohalar uchun moslashtirishning samarali usulidir. Funksionalizatsiya qilish esa, (ya'ni geteroatomlar kiritish) UNTlarning eruvchanligi, kimyoviy reaktivligi, nuqson zichligi va umumiy fizik-kimyoviy xususiyatlarini o'zgartirishda muhim rol o'ynaydi [8]. Jumladan, IQUNT larga bor (B), azot (N), palladiy (Pd), fluor (F), platina (Pt) kabi atomlarni kiritish ularning elektron tuzilishi, zaryad taqsimlanishi kabi xususiyatlarini o'zgartiradi va ularni mexanik, elektron, issiqlik va katalitik xossalarni yaxshilaydi [9].

So'nggi yillarda ushbu atomlar orasida B kiritilgan uglerodli nanotrubka (B-UNT)lar strukturaning elektron tuzilishini sezilarli darajada o'zgartirishi, katalitik samaradorlikni kuchaytirishi tufayli keng doirada ilmiy qiziqish uyg'otmoqda [10,11]. B va C atomlari o'lichamlari o'xshashligi tufayli B, atomlarini grafit panjarasiga kiritish oson bo'ladi, bu esa strukturaviy barqaror B-UNTLar hosil bo'lishini ta'minlaydi [12].

Ushbu tadqiqot molekulyar dinamika (MD) usulida modellashtirishlar yordamida B kiritilgan IQUNT ning elektron va issiqlik xususiyatlarini o'rganishga qaratilgan.

**Metod va tavsilotlar.** Biz IQUNT ga B atomlarini kiritishni reaktiv MD modellashtirishlari yordamida o'rgandik. Ushbu simulyatsiyalar LAMMPS paketida bajarildi. Atomlararo o'zaro ta'sirlar ReaxFF reaktiv kuch maydoni yordamida tasvirlangan bo'lib, bu atomlarni kiritish jarayonida bog'lanishlarning uzilishi va hosil bo'lishi hamda zaryadlarning taqsimlanishini aniq ifodalash imkonini beradi. Model tizimi sifatida keng o'rganilgan (8,0)@(17,0) xiralikdagi IQUNT tanlandi (ya'ni, B-IQUNT(8,0)@(17,0) (1-rasm).

B-IQUNT(8,0)@(17,0) modelida ichki va tashqi nanotrubka diametrlari mos ravishda 6.37 Å va 13.57 Å (uzunligi 29.82 Å) [13]. Ushbu nanotrubka 622 ta C atomidan iborat, bo'lib, unga 0% dan 9.65% gacha bo'lgan bor atomlari kiritilgan.



1-rasm. B-IQUNT(8,0)@(17,0) ning yuqori va yon tomondan ko'rinishi. C va bor B atomlari mos ravishda kulrang va qizil rangda ko'rsatilgan.

Dastlab, har bir B-IQUNT(8,0)@(17,0) konfiguratsiyasining umumiy energiyasi konjugat gradient algoritmi yordamida minimal holatga keltirildi, bu esa, mexanik jihatdan barqaror boshlang'ich tuzilmani olish imkonini beradi. Minimallashtirishdan so'ng, barcha tizimlarning harorati va bosimi (300, 600, 900, 1200 va 1500 K; 0 Pa)  $NpT$  ansambli Berendsen termostat va barostat orqali tenglashtirildi. B atomlarining IQUNT sirtlarida kimyoviy adsorbsiya dinamikasini aniqroq tavsiflash uchun keyinchalik 300-1500 K oralig'ida 100 ps davomida Bussi thermostat ( $NVT$ ) yordamida bajarildi. Termal o'tkazuvchanlik tahlillari esa  $NVE$  ansambli ostida bajarildi, bu umumiy energiyani saqlash va issiqlik oqim xususiyatlarini bevosita baholash imkonini berdi.

Sof IQUNT sirtlaridagi bor kiritilgan joylarining nisbiy konsentratsiyasini (%) quyidagi formula yordamida hisoblandi:

$$\rho = \frac{\text{number of doping boron atoms } (N_B)}{\text{total atoms in a pristine DWNT } (N_C)} * 100\% \quad (1)$$

Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientini aniqlash uchun Green-Kubo formulasi ishlatildi [14]:

$$k = \frac{1}{3V k_B T^2} \int_0^\infty \langle J(0) \cdot J(t) \rangle dt \quad (2)$$

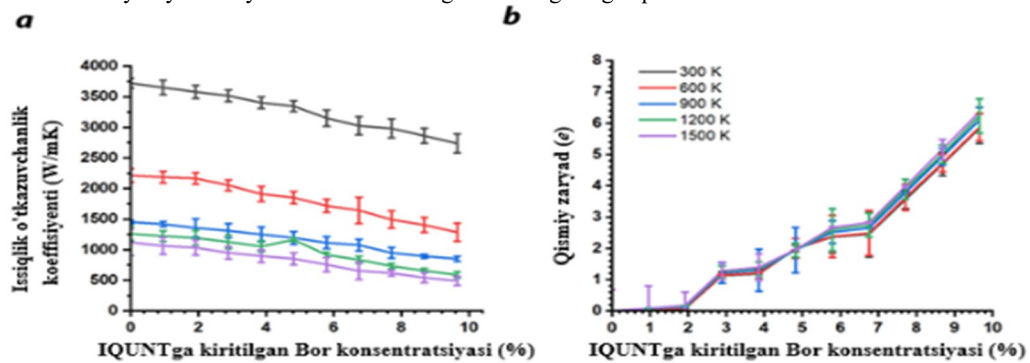
Barcha simulyatsiyalarda atomlararo o'zaro ta'sirlarni aniq tasvirlash uchun MD vaqt qadamini 0.1 fs qilib belgiladik. Har bir tadqiqot holati uchun simulyatsiyalar 5 marta bajarildi va natijalar tegishli fizik kattaliklarning o'rta qiymati orqali olindi.

**Natijalar va muhokama.** B-IQUNT(8,0)@(17,0) issiqlik va elektr o'tkazuvchanlik xususiyatlari harorat va bor konsentratsiyasiga sezilarli darajada bog'liq. Harorat oshgani sayin, fonon-fonon tarqalishi va kiritma kiritilishi natijasida yuzaga kelgan tartibsizliklar birgalikda issiqlik o'tkazuvchanligini kamaytiradi, elektr o'tkazuvchanlik esa dastlab  $p$ -turi zaryad tashuvchilarining hosil bo'lishi tufayli yaxshilanadi, ammo yuqori konsentratsiya darajalarida nuqsonlar tufayli tarqalish kuchaygani sababli pasayadi. Ushbu o'zaro bog'langan ko'rsatgichlar B-IQUNT(8,0)@(17,0) da turli temperatura va konsentratsiyalarda elektron va issiqlik o'tkazuvchanlik mexanizmlari o'rtasidagi murakkab o'zaro ta'sirni namoyon etadi [14].

B-IQUNT (8,0)@(17,0) ni turli haroratlarda sintez qilinganda, kiritma kiritilish darajasi va natijaviy strukturalar bir qator termodinamik va kinetik omillarga bog'liq bo'ladi. Oldingi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, B ni C tarmog'iga samarali kiritish yuqori haroratlarini talab qiladi, odatda 600-1100°C oralig'ida va bu B-C bog'larini barqaror hosil qilish imkonini beradi [15]. Nisbatan past sintez haroratlarida, B ni UNTlarga kiritish ko'pincha grafit tarmog'ida ko'plab struktural nuqsonlarning hosil bo'lishiga olib keladi. Bunday nuqsonlar odatda UNTlarning elektr va issiqlik o'tkazuvchanlik samaradorligini kamaytiradi. Aksincha, bor kiritilishi yetarli darajada yuqori haroratlarda amalga oshirilsa, issiqlikka chidamlilikni oshirish va elektr hamda mexanik xususiyatlarni yaxshilash imkonini beradi [16]. Shu sababli, ushbu ishda B-IQUNT(8,0)@(17,0) ning harorat ta'sirini 300-1500 K oralig'ida o'rganildi.

Simulyatsiya natijalari B-IQUNT(8,0)@(17,0) yuzasida saqlanadigan bor miqdori va kiritmalarning fazaviy taqsimotida aniq haroratga bog'liq o'zgarishlarni ko'rsatadi. Ushbu o'zgarishlar nanotrubka egrili, o'zaro bog'lanish geometriyasi va qo'shni uglerod halqalari konfiguratsiyasi kabi bir qator o'zaro bog'langan struktural va energetik omillardan kelib chiqadi, bularning barchasi B atomlarining UNT yuzalaridagi kimyoviy adsorbsiya va barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

Ushbu ishda o'rganilgan harorat intervali (300-1500 K) IQUNT yuzasiga muvaffaqiyatli kiritilgan bor atomlari soni va ularning konfiguratsiyalarining barqarorligini aniqlashda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Shu sababli, B-IQUNT(8,0)@(17,0) ning strukturaviy va fizik-kimyoviy xususiyatlari kiritma kiritilgan haroratga bog'liq bo'ladi.



2-rasm. a) Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyentining B konsentratsiyasiga bog'liqligi, b) Adsorbsiyalangan B atomlarining qisimiy zaryadining haroratga bog'liq holda o'zgarishi.

Bundan tashqari, C (2.55) va B (2.04) o'rtasidagi elektromanfiylik farqi bor atomlarini kiritish vaqtida elektron zaryadining sezilarli qayta taqsimlanishiga olib keladi. Elektromanfiyligi past bo'lganligi sababli, bor atomlari elektron donorligiga moyil bo'lib, qisimiy musbat zaryad hosil qiladi, u 300-1500 K harorat oralig'ida doping konsentratsoyasi ( $\rho$  %) oshishi bilan ortadi. Bor konsentratsoyasi oshgani sayin, IQUNT yuzasida elektron yetishmaydigan sohalar soni ko'payadi va bu nanotrubkaning tabiiy elektron tuzilishini buzadi. Ushbu kuchaygan zaryad nomutanosibligi bor atomlari va qo'shni uglerod atomlari o'rtasidagi, shuningdek bor atomlari o'rtasidagi elektron almashinuvi o'zaro ta'sirlarini kuchaytiradi. Shu sababli,  $\rho$  % oshishi bilan qisimiy zaryadning asta-sekin ortishi bor kiritilishi natijasida IQUNTlarning elektron xususiyatlarida yuzaga kelgan o'zgarishlarni samarali aks ettiradi.

B-IQUNT(8,0)@(17,0) nanotrubkalarining qisimiy zaryadlari 300-1500 K harorat oralig'ida tizimli ravishda tahlil qilindi. 300 K da, qisimiy zaryad kiritma kiritilgandan so'ng taxminan  $0.032e$  (0.96%) dan  $6.352e$  (9.65%) gacha oshdi,

B-IQUNT(8,0)@(17,0) da qiymatlar 600 K da  $\sim 0.041e$  (0.96%) dan  $\sim 4.867e$  (9.65%) gacha bo'ldi. Yuqori haroratlarda qisimiy zaryadlar mos ravishda oshdi: 900 K da  $\sim 0.053e$  (0.96%) dan  $\sim 4.996e$  (9.65%) gacha, 1200 K da  $\sim 0.065e$  (0.96%) dan  $\sim 6.096e$  (9.65%) gacha, va 1500 K da  $\sim 0.082e$  (0.96%) dan  $\sim 6.352e$  (9.65%) gacha. Ushbu natijalar bor konsentratsoyasi oshishi bilan IQUNT dagi musbat qisimiy zaryadlarning proporsional ortishini ko'rsatadi va ilgari o'tkazilgan tadqiqotlarda kuzatilgan asosiy yo'nalishlarni tasdiqlaydi [12].

2a-rasm B-IQUNT(8,0)@(17,0) ning turli xil B konsentratsoyasida ( $\rho$ %) kiritilgan holdagi issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti ( $k$ ) harorat (300-1500 K) funksiyasi sifatida ko'rsatilgan. Ayniqsa, bor konsentratsoyasi 0.96% bo'lgan B-IQUNT(8,0)@(17,0) da 300 K da  $k$  ning qiymati  $3651 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ni tashkil qilgan va 900 K ga yetganda  $1418 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  gacha kamaygan. Haroratning oshishi natijasida  $k$  taxminan 2.57 marta pasaygan. 900 K dan 1500 K gacha qo'shimcha harorat oshishi esa  $k$  ni taxminan 1.33 marta yana kamaytirgan. Umuman olganda, 300 K va 1500 K issiqlik o'tkazuvchanliklarini solishtirganda, taxminan 3.44 marta kamayish kuzatilgan.

Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, hatto nisbatan kam miqdorda bor atomlari kiritilganda ham B-IQUNTlarning  $k$  harorat oshishi bilan sezilarli darajada kamayadi. Ushbu xususiyat yuqori haroratlarda fonon-fonon tarqalishining kuchayishi bilan izohlanadi, bu nanotrubka tuzilmasida issiqlik o'tkazuvchanlik samaradorligini sezilarli darajada pasaytiradi. Umuman olganda, bor kiritilgan IQUNT larda issiqlik o'tkazuvchanlik aniq va tizimli o'zgarishini keltirib chiqaradi, bunda ta'sir kiritma konsentratsoyasi va harorat oshgani sayin kuchayadi. Bor atomlari kam miqdorda kiritilganda ( $\rho < 3\%$ ) va o'rta haroratlarda (300-400 K) issiqlik o'tkazuvchanligi biroz oshishi yoki deyarli saqlanib qolishi kuzatiladi, bu esa tarmoq buzilishi cheklanganligi va fonon tarqalishi nisbatan zaifligi bilan izohlanadi.

Biroq, bor konsentratsoyasi  $\sim 4\text{-}5\%$  dan oshganda, almashtirish nuqsonlari va mahalliy tarmoq strukturaviy buzilish fonon tarqalishini sezilarli darajada kuchaytiradi va natijada issiqlik o'tkazuvchanligi sezilarli darajada kamayadi. Bu degradatsiya o'rta va yuqori konsentratsoya oralig'ida ( $\rho \sim 6\text{-}9.65\%$ ) yanada kuchayadi, chunki tuzilishdagi tartibsizlik fonon harakati jarayonini boshqaradi. Ushbu oraliqda fononlarning o'rtacha erkin yo'llari nuqsonlar sababli tarqalish, massadagi farq va lokal cho'zilish maydonlari natijasida sezilarli qisqaradi. Shu sababli, yuqori konsentratsoyadagi B-IQUNT(8,0)@(17,0) tizimida issiqlik o'tkazuvchanligi B konsentratsoyasi  $\sim 9.65\%$  ga yetganda minimal qiymatlarga yaqinlashadi, bu samarali issiqlik uzatish yo'llarining deyarli to'liq buzilganini bildiradi.

Harorat ushbu ta'sirlarni kuchaytirishda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Yuqori haroratlarda ( $T > 500 \text{ K}$ ) fonon-fonon tarqalishi asosiy issiqlik tarqatish mexanizmi bo'lib, issiqlik o'tkazuvchanligi kiritma konsentratsoyasidan qat'iy nazar kamayadi [38]. Shu bilan birga, bor bilan IQUNTlarda ( $>6\%$ ) bu tabiiy haroratga bog'liq pasayish kiritma kiritilishidan kelib chiqqan strukturaviy tartibsizlik bilan yanada kuchayadi, bu sistemada tebranishlarining tarqalishini cheklab qo'yadi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, bor konsentratsoyasi taxminan  $7\text{-}8\%$  ga yetganda, 300-1500 K haroratlar oralig'ining barchasida issiqlik o'tkazuvchanligining keskin pasayishi barqaror ravishda namoyon bo'la boshlaydi. Umuman olganda, almashtirish nuqsonlar, lokal tarmoq buzilishlari, massadagi farq tarqalishi va kuchaytirilgan garmonik bo'lmagan fonon o'zaro ta'sirlari birgalikda B bilan doping qilingan IQUNTlarda haroratga bog'liq issiqlik o'tkazuvchanligining pasayishiga olib keladi. Ushbu natijalar B atomlarining kiritilishi IQUNTlarning tebranish holatlarini sezilarli darajada o'zgartirib, natijada, yuqori konsentratsoyalar va kuchli issiqlik ta'siri sharoitida, energiya uzatilishining mexanizmlarini qayta shakllantirishini ko'rsatadi.

**Xulosa.** Natijalar shuni ko'rsatadiki, bor atomlarini IQUNTga kiritish elektr va issiqlik o'tkazuvchanlik xususiyatlarida sezilarli o'zgarishlarni keltirib chiqaradi. Bu o'zgarishlar, qisimiy zaryadning oshishi bilan ifodalangan elektr o'tkazuvchanlikning yaxshilanishi va shu bilan birga issiqlik o'tkazuvchanligining ( $k$ ) kamayishi bilan tavsiflanadi. B-IQUNT(8,0)@(17,0)da B

konsentratsiyasi oshishi bilan qisman zaryadning o'zgarishi zaryad taqsimlanishi, harorat ta'sirida elektron qo'zg'alishi, kiritmalar tufayli yuzaga kelgan struktural o'zgarishlar va ion ta'sirlarining murakkab o'zaro ta'siri natijasida yuzaga kelishini ko'rsatadi. Buning aks, issiqlik o'tkazuvchanlik xususiyati teskari qonuniyatni namoyon qiladi. Bor konsentratsiyasi oshgani sayin, issiqlik o'tkazuvchanligi asta-sekin kamayadi, bu esa nuqsonlar tufayli fonon tarqalishining kuchayishini aks ettiradi. Natijalar B kiritilgan IQUNTLarning elektr va issiqlik o'tkazuvchanligini samarali boshqarish imkonini beradi, bu esa ularni nanoelektronika va issiqlik xossalari bilan bog'liq qurilmalarda qo'llash imkoniyatlarini oshiradi.

#### ADABIYOTLAR

1. S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature* 354, 56 (1991).
2. K. E. Moore et al., Double-Walled Carbon Nanotube Processing, *Adv. Mater.* 27, 3105 (2015).
3. S. Iijima, Carbon nanotubes: past, present, and future, *Phys. B Condens. Matter* 323, 1 (2002).
4. R. Sr, K. Priyadarshini, and D. Panda, A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application, *Mater. Sci. Eng. B* 268, 115095 (2021).
5. M. F. Naief et al., A review of the role of carbon nanotubes for cancer treatment based on photothermal and photodynamic therapy techniques, *J. Organomet. Chem.* 999, 122819 (2023).
6. Utkir B. Uljaev, Shakhnozaxon A. Muminova, Ishmumin D. Yadgarov, Nitrogen Adsorption on Double-Walled Carbon Nanotube at Different Temperatures: Mechanistic Insights from Molecular Dynamics Simulations, *East European Journal of Physics*, 1, 361-365 (2024)
7. U. Uljayev, F. Turaev, A. Ulukmuradov, K. Mekhmonov, and U. Khalilov, Enhanced hydrogen retention in Ni-filled carbon nanotubes at high temperatures, *Chem. Phys. Lett.* 874–875, 142177 (2025).
8. D. Liu, et al., Functionalization of carbon nanotubes for multifunctional applications, *Trends Chem.* 6, 186 (2024).
9. U.B. Uljayev, D.V. Alyabyev, I.D. Yadgarov, U.B. Khalilov, Modeling the interaction of carbon nanotubes with hydrogen atoms, *UJP* 23, 3 (2021).
10. U. Uljayev et al., Boron interaction with double-walled carbon nanotubes across temperature ranges, *Mod. Electron. Mater.* 10, 3 (2024).
11. S. V. Boroznin, Carbon nanostructures containing boron impurity atoms: synthesis, physicochemical properties and potential applications, *Mod. Electron. Mater.* 8, 1 (2022).
12. Utkir Uljayev et al., Boron interaction with double-walled carbon nanotubes across temperature ranges, *Mod. Electron. Mater.* 10(3), 145-152 (2025).
13. G. Chen et al., Chemically Doped Double-Walled Carbon Nanotubes: Cylindrical Molecular Capacitors, *Phys. Rev. Lett.* 90, 257403 (2003).
14. Y.-K. Kwon and P. Kim, Unusually High Thermal Conductivity in Carbon Nanotubes, in *High Thermal Conductivity Materials*, edited by S. L. Shindé and J. S. Goela (Springer, New York, NY, 2006), pp. 227–265.
15. S. V. Sawant et al., Boron doped carbon nanotubes: Synthesis, characterization and emerging applications – A review, *Chem. Eng. J.* 427, 131616 (2022).
16. M. M. S. Fakhrabadi, A. Allahverdizadeh, V. Norouzfard, and B. Dadashzadeh, Effects of boron doping on mechanical properties and thermal conductivities of carbon nanotubes, *Solid State Commun.* 152, 1973 (2012).