NANOMATERIALLARNING ZAMONAVIY FIZIKA VA TEXNIKADAGI ISTIQBOLLARI

Saidov Qurbon Sayfullayevich

Buxoro davlat universiteti, Fizika kafedrasi

Annotatsiya. Tezisda nanomateriallar xossalarining o‘lchamga bog‘liqligini belgilovchi fizik mexanizmlar — kvant cheklanish, sirt/hajm nisbatining keskin ortishi va past o‘lchamli tizimlardagi holatlar zichligining o‘zgarishi tahlil qilinadi. Yarimo‘tkazgich kvant nuqtalari, grafen va ikki o‘lchamli materiallar misolida ularning nanoelektronika, fotonika, energetika va tibbiyotdagi qo‘llanish istiqbollari hamda amaliyotga joriy etishdagi asosiy muammolar asoslab beriladi.

Kalit so‘zlar: nanomaterial, kvant cheklanish, kvant nuqta, grafen, eksiton Bor radiusi, holatlar zichligi, nanoelektronika, fotovoltaika.

Dolzarbligi. XXI asr fizikasi va texnikasining eng muhim yo‘nalishlaridan biri — kamida bitta o‘lchami 1–100 nm oralig‘ida bo‘lgan materiallarni yaratish va ularning xossalarini boshqarishdir. Bu sohaning fundamental ahamiyati 2010-yilda grafen bo‘yicha (A. Geym, K. Novosyolov) va 2023-yilda kvant nuqtalarni kashf etish va sintez qilish bo‘yicha (A. Yekimov, L. Brus, M. Bavendi) berilgan Nobel mukofotlari bilan e’tirof etilgan. Nanomateriallarning noyobligi shundaki, ularda xossalar faqat kimyoviy tarkib bilan emas, balki zarracha o‘lchami va shakli bilan ham belgilanadi, bu esa bir xil moddadan turli xossali materiallar olish imkonini beradi.

1. O‘lcham effektlarining fizik asoslari

Nanomateriallarda xossalarning o‘zgarishiga ikki asosiy omil sabab bo‘ladi. Birinchisi — *geometrik (sirt) effekt*: radiusi R bo‘lgan sferik zarrachada sirt/hajm nisbati

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R} \quad (1)$$

ko‘rinishida o‘sadi va $R \approx 3$ nm da atomlarning salmoqli qismi (taxminan 30–50 %) sirtda joylashadi. Natijada erish harorati pasayadi, katalitik faollik va adsorbsion qobiliyat keskin ortadi. Ikkinchisi — *kvant cheklanish effekti*: zarracha o‘lchami eksitonning Bor radiusi

$$a_B = \varepsilon \frac{m_0}{\mu} a_0, \frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (2)$$

bilan taqqoslanadigan bo‘lganda energetik spektr diskret tus oladi (bu yerda μ — elektron-kovak juftining keltirilgan massasi, a_0 = 0,053 nm — vodorod atomining Bor radiusi, ε — muhitning dielektrik singdiruvchanligi).

Kuchli cheklanish rejimida ($R < a_B$) kvant nuqtaning asosiy optik o‘tish energiyasi Brus yaqinlashuvida quyidagicha ifodalanadi:

$$E(R) \approx E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) - \frac{1.8e^2}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R} \quad (3)$$

bu yerda E_g — hajmiy kristallning taqiqlangan zona kengligi, m_e^* va m_h^* — elektron va kovakning effektiv massalari. (3) dagi ikkinchi had R^{-2} qonuniyat bilan o‘sib, nurlanish to‘lqin uzunligini faqat zarracha o‘lchamini o‘zgartirish orqali butun ko‘rinadigan diapazon bo‘ylab sozlash imkonini beradi. Masalan, CdSe uchun ($a_B \approx$ 5–6 nm) diametrni 2 nm dan 7 nm gacha o‘zgartirish lyuminessensiyani ko‘k sohadan qizil sohagacha siljitadi.

Past o‘lchamli tizimlarda holatlar zichligi ham tubdan o‘zgaradi:

$$g_{3D}(E) \propto \sqrt{E}, g_{2D}(E) \propto \sum_n \Theta(E - E_n), \quad (4a)$$

$$g_{1D}(E) \propto \sum_n \frac{1}{\sqrt{E - E_n}}, g_{0D}(E) \propto \sum_n \delta(E - E_n), \quad (4b)$$

bu yerda Θ — Xevisayd funksiyasi, E_n — o‘lchamli kvantlanish sathlari. Kvant nuqtalardagi δ-simon spektr yarimo‘tkazgich lazerlarining bo‘sag‘aviy tokini kamaytirish va uning haroratga barqarorligini oshirishga asos bo‘lgan.

2. Zamonaviy fizika va texnikadagi asosiy yo‘nalishlar

Nanoelektronika. Kremniy texnologiyasi bir necha nanometrli texnologik normalar sohasiga o‘tdi, bunda kanalni har tomondan o‘rab oluvchi zatvorli (GAA) nanolist tranzistorlar qo‘llanmoqda. Klassik masshtablash chegarasiga yaqinlashilgani sababli atom qalinligidagi kanal materiallari — grafen, MoS_2, WSe_2 kabi o‘tish metallari dixalkogenidlari faol o‘rganilmoqda. Grafenda Dirak nuqtasi atrofida elektronlar dispersiyasi chiziqli: $E(\mathbf{k}) = \pm\hbar v_F|\mathbf{k}|$, $v_F \approx 10^6$ m/s, ya’ni zaryad tashuvchilar massasiz Dirak fermionlari kabi harakatlanadi. Suspenziyalangan grafenda harakatchanlik $\mu \sim 2 \cdot 10^5$ sm²/(V·s) ga yetishi eksperimental ko‘rsatilgan, bu kremniydagidan ikki tartib yuqori.

Fotonika va optoelektronika. Kvant nuqtalar asosidagi displeylar, bir fotonli manbalar (kvant kriptografiya uchun), plazmonik nanostrukturalar asosidagi sensorlar va metamateriallar yorug‘likni to‘lqin uzunligidan kichik masshtabda boshqarish imkonini bermoqda. Metall nanosferada lokallashgan sirt plazmon rezonansi kvazistatik yaqinlashuvda qutblanuvchanlik maxrajining nolga intilish shartidan aniqlanadi:

$$\alpha = 4\pi R^3 \frac{\varepsilon_m(\omega)-\varepsilon_d}{\varepsilon_m(\omega)+2\varepsilon_d}, \mathrm{Re}\varepsilon_m(\omega_{LSPR}) = -2\varepsilon_d \qquad (5)$$

Au va Ag nanozarrachalarida bu rezonans lokal maydonni bir necha tartibga oshiradi; sirtda kuchaytirilgan kombinatsion sochilishda (SERS) kuchayish koeffitsiyenti taxminan $|E_{loc}/E_0|^4$ ga proporsional bo‘lgani uchun yagona molekulalarni aniqlash imkoni tug‘iladi.

Energetika. Nanostrukturalangan perovskit qatlamli quyosh elementlarining laboratoriya FIK qiymatlari kremniy elementlari darajasiga yetdi; kvant nuqtalarda bir fotondan bir necha eksiton hosil bo‘lishi (multieksiton generatsiya, $\hbar\omega \geq 2E_g$) Shokli–Kvayser chegarasini yengib o‘tishning nazariy yo‘lini ochadi. Litiy-ionli akkumulyatorlarda kremniy

nanosimlar va uglerod nanostrukturalari elektrod sig‘imini va zaryadlanish tezligini oshirmoqda.

Tibbiyot va ekologiya. Superparamagnit Fe_3O_4 nanozarrachalari magnit-rezonans tomografiyada kontrast vosita va magnit gipertermiya agenti sifatida qo‘llanilmoqda; ularning Neel relaksatsiya vaqti $\tau_N = \tau_0 \exp\left(\frac{KV}{k_B T}\right)$ zarracha hajmiga eksponensial bog‘liq bo‘lgani uchun o‘lchamni boshqarish orqali qizish samaradorligini sozlash mumkin. Funksionallashtirilgan nanotashuvchilar dori moddasini adres bo‘yicha yetkazishda, TiO_2 va ZnO nanozarrachalari esa fotokatalitik suv tozalashda samarali.

3. Muammolar va rivojlanish istiqbollari

Nanomateriallarni keng joriy etish yo‘lida quyidagi muammolar saqlanib qolmoqda: (i) o‘lcham bo‘yicha taqsimotni tor saqlagan holda sanoat miqyosida takrorlanuvchan sintez; (ii) sirt nuqsonlari va oksidlanish natijasida xossalar degradatsiyasi; (iii) nanozarrachalarning biologik va ekologik xavfsizligi (toksikologiya) hamda me’yoriy bazaning yetarli emasligi; (iv) nanometr masshtabdagi o‘lchov va metrologiya. Yaqin istiqboldagi asosiy yo‘nalishlar sifatida ikki o‘lchamli materiallarning van-der-Vaals geterostrukturalari, topologik nanomateriallar, spintronika va kvant hisoblash elementlari, shuningdek, mashinali o‘qitish yordamida yangi nanomateriallarni maqsadli loyihalash ko‘rsatiladi.

Xulosa. Nanomateriallarning xossalari o‘lchamga bog‘liq fundamental fizik qonuniyatlar — kvant cheklanish va sirt effektlari bilan belgilanadi, bu esa ularni “loyihalanuvchi” materiallarga aylantiradi. Ushbu xususiyatlar nanoelektronika, fotonika, energetika va tibbiyotda texnologik sakrashni ta’minlamoqda. Oliy ta’limda qattiq jismlar fizikasi kurslariga nanostrukturalar fizikasi bo‘yicha alohida modullarni kiritish va respublikada sintez hamda

xarakterlash (XRD, SEM/TEM, AFM, fotolyuminessent spektroskopiya) laboratoriya bazasini rivojlantirish dolzarb vazifa hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666–669.

2. Brus L.E. Electron–electron and electron–hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state // J. Chem. Phys. – 1984. – Vol. 80, № 9. – P. 4403–4409.

3. Ekimov A.I., Onushchenko A.A. Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals // JETP Lett. – 1981. – Vol. 34. – P. 345–349.

4. Bolotin K.I., Sikes K.J., Jiang Z. et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene // Solid State Commun. – 2008. – Vol. 146. – P. 351–355.

5. Maier S.A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. – New York: Springer, 2007. – 223 p.

6. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

7. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology. – Hoboken: Wiley, 2003. – 400 p.