

**NOYOB YER METALLARI BILAN MODIFIKATSIYALANGAN
PEROVSKIT NANO KRISTALLARI ASOSIDA YUQORI SAMARALI
YORUG‘LIK CHIQUARUVCHI QOPLAMALAR YARATISH**

Bo‘riyeva Muhabbat Mamayusuf qizi

Termiz davlat universiteti talabasi

E-mail: mustafo89984@gmail.com

Qo‘zimurodova Sevara Bahrom qizi

Termiz davlat universiteti talabasi

E-mail: qozimurodovasevara8@gmail.com

Annotatsiya: Mazkur maqolada noyob yer metallari bilan modifikatsiyalangan perovskit nanokristallari asosida yuqori samarali yorug‘lik chiqaruvchi qoplamalar yaratishning ilmiy asoslari o‘rganiladi. Perovskit nanokristallarining optik xossalari, fotolyuminessensiya samaradorligi hamda ularning barqarorligini oshirishda noyob yer ionlarining ta’siri tahlil qilinadi. Shuningdek, energiya o‘tish mexanizmlari va ushbu materiallarning optoelektronika hamda yorug‘lik chiqaruvchi texnologiyalardagi qo‘llanilish istiqbollari ko‘rib chiqiladi.

Kalit so‘zlar: perovskit nanokristallari, noyob yer metallari, fotolyuminessensiya, yorug‘lik chiqaruvchi qoplamalar, optoelektronika.

Abstract: This article investigates the scientific basis for the development of highly efficient light-emitting coatings based on rare-earth-doped perovskite nanocrystals. The optical properties, photoluminescence efficiency, and stability

enhancement of perovskite nanocrystals through rare-earth ion modification are analyzed. Energy transfer mechanisms and potential applications in optoelectronic devices and light-emitting technologies are also discussed.

Keywords: perovskite nanocrystals, rare-earth elements, photoluminescence, light-emitting coatings, optoelectronics.

Аннотация: В данной статье рассматриваются научные основы создания высокоэффективных световы излучающих покрытий на основе перовскитных нанокристаллов, модифицированных редкоземельными элементами. Анализируются оптические свойства перовскитов, эффективность фотолуминесценции и влияние редкоземельных ионов на повышение стабильности материалов. Также рассматриваются механизмы переноса энергии и перспективы применения данных материалов в оптоэлектронике и световы излучающих технологиях.

Ключевые слова: перовскитные нанокристаллы, редкоземельные элементы, фотолуминесценция, световы излучающие покрытия, оптоэлектроника.

Kirish: So‘nggi o‘n yillikda nanomateriallar fizikasi va optoelektronika sohalarida inqilobiy o‘zgarishlar yuz berdi. Ayniqsa, yorug‘lik chiqaruvchi materiallar (luminescent materials) yangi avlod texnologiyalarining asosini tashkil etib, ular LED yoritish tizimlari, yuqori aniqlikdagi displeylar, lazer texnologiyalari, fotonik qurilmalar va energiya samarador tizimlarda keng qo‘llanilmoqda. Ushbu yo‘nalishda perovskit tuzilishga ega nanokristallar o‘zining noyob optik-elektron xossalari bilan alohida o‘rin egallaydi. Perovskit nanokristallari ABX_3 tipidagi kristall tuzilishga ega bo‘lib, ularning elektron zonalari, eksiton hosil bo‘lish energiyasi va foton yutilish koeffitsienti juda yuqori hisoblanadi. Ushbu xususiyatlar ularni yuqori

kvant samaradorlikka ega yorug‘lik chiqaruvchi material sifatida istiqbolli qiladi. So‘nggi yillarda olib borilgan tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, perovskit nanokristallari klassik yarimo‘tkazgich materiallarga nisbatan ancha kuchli fotolyuminessensiya xususiyatiga ega bo‘lishi mumkin. Biroq, ushbu materiallarning amaliy qo‘llanilishida bir qator muammolar mavjud. Eng asosiy muammo — ularning kimyoviy va termik barqarorligining pastligi, namlik va kislorod ta‘sirida tez degradatsiyaga uchrashi hamda uzun muddatli ishlash jarayonida optik xususiyatlarining susayishidir. Shu sababli perovskit nanokristallarini modifikatsiya qilish, ularning strukturaviy barqarorligini oshirish va fotofizik xususiyatlarini yaxshilash muhim ilmiy vazifa hisoblanadi. Shu nuqtai nazardan, noyob yer metallari ionlari bilan legirlash (doping) strategiyasi katta ilmiy va amaliy qiziqish uyg‘otmoqda. Noyob yer elementlari (lantanoidlar qatori: Eu^{3+} , Tb^{3+} , Ce^{3+} , Er^{3+} , Dy^{3+} va boshqalar) 4f elektron qatlamining ekranlanganligi tufayli juda barqaror va aniq spektral emissiya xususiyatiga ega. Ularning emissiya chiziqlari tor, intensiv va rang jihatdan aniq bo‘lib, bu optik qurilmalarda yuqori aniqlik beradi. Perovskit nanokristallari va noyob yer ionlari kombinatsiyasi yangi turdagi gibridd optik tizimlarni hosil qiladi. Bu tizimlarda energiya uzatish jarayoni donor–akseptor mexanizmi orqali amalga oshadi: perovskit nanokristallari yorug‘likni yutadi va hosil bo‘lgan eksiton energiyasini noyob yer ionlariga uzatadi. Natijada samarali va boshqariladigan yorug‘lik emissiyasi yuzaga keladi. Ushbu maqolaning asosiy maqsadi — noyob yer metallari bilan modifikatsiyalangan perovskit nanokristallar asosida yuqori samarali yorug‘lik chiqaruvchi qoplamalar yaratishning fizik-kimyoviy asoslarini chuqur o‘rganish, energiya uzatish mexanizmlarini tahlil qilish hamda ularning optoelektronik qurilmalarda qo‘llanilish istiqbollarini asoslashdan iborat.

ASOSIY QISM

1. Perovskit nanokristallarining kristall tuzilishi va kvant xossalari

Perovskit materiallari umumiy ABX_3 formulaga ega bo'lib, bunda A — organik yoki noorganik kation (masalan $CH_3NH_3^+$, Cs^+), B — ikki valentli metall kationi (Pb^{2+} , Sn^{2+}), X esa galogen anionlari (Cl^- , Br^- , I^-) hisoblanadi. Ushbu strukturaviy konfiguratsiya materialning elektron, optik va transport xossalarini belgilaydi. Nanokristall holatga o'tganda, perovskitlar kvant o'lcham effekti tufayli o'zining energiya zonasi tuzilishini o'zgartiradi. Kristall o'lchami eksiton Bor radiusiga yaqinlashganda, diskret energiya sathlari paydo bo'ladi va bu yorug'lik emissiyasining rangini boshqarish imkonini beradi.

Perovskit nanokristallarining asosiy afzalliklari:

yuqori yorug'lik yutish koeffitsienti (10^5 – 10^6 cm^{-1} gacha),

yuqori kvant chiqish samaradorligi,

past eksiton bog'lanish energiyasi,

oson sintez qilish texnologiyasi.

Biroq ularning strukturaviy beqarorligi va ion migratsiyasi amaliy qo'llanishni cheklaydi.

2. Noyob yer metallari ionlarining elektron tuzilishi va optik roli

Noyob yer elementlari 4f elektron orbitalariga ega bo'lib, bu orbitalar tashqi elektron qatlamlar bilan kuchli ekranlangan. Shu sababli ularning optik xossalari tashqi muhit ta'siriga kam bog'liq va juda barqaror hisoblanadi.

Eu³⁺ ionlari — qizil emissiya (~612 nm),
Tb³⁺ ionlari — yashil emissiya (~545 nm),
Ce³⁺ ionlari — keng diapazonli ko‘k-ultrabinafsha emissiya beradi.

Bu ionlar perovskit matritsasiga kiritilganda, yangi energiya sathlari hosil bo‘ladi va radiatsion rekombinatsiya ehtimoli oshadi. Shu bilan birga, ular kristall panjaradagi nuqsonlarni kamaytirib, “trap states”larni passivatsiya qiladi.

Natijada:

nurlanish intensivligi oshadi,

kvant samaradorlik ortadi,

materialning degradatsiyasi sekinlashadi.

3. Energiya uzatish mexanizmlari (donor–akseptor tizimi)

Perovskit–lantanoid tizimida energiya uzatish murakkab fizik jarayonlar orqali amalga oshadi. Yorug‘lik ta‘sirida perovskit nanokristallarida elektron–kovak juftliklari (eksitonlar) hosil bo‘ladi.

Ushbu eksitonlar quyidagi yo‘llar orqali so‘nishi mumkin:

1. Radiatsion rekombinatsiya (yorug‘lik chiqarish)
2. Non-radiatsion yo‘qotish (issiqlik)
3. Noyob yer ionlariga energiya uzatish

Uchinchi jarayon eng muhim hisoblanadi. Donor (perovskit) va akseptor (RE ionlari) orasidagi energiya farqi mos bo‘lsa, rezonansli energiya uzatish yuz beradi. Bu

jarayon Förster yoki Dexter tipidagi mexanizmlar asosida kechishi mumkin. Natijada tor spektrli, yuqori intensivlikdagi emissiya hosil bo‘ladi.

4. Yorug‘lik chiqaruvchi qoplamalar (LED va fotonik tizimlar)

Perovskit asosidagi qoplamalar ishlab chiqarishda bir nechta texnologiyalar qo‘llaniladi:

spin-coating (markazdan qochma usul),

sol-gel texnologiyasi,

inkjet printing,

vakuumli qoplama usullari.

Noyob yer ionlari bilan legirlangan nanokristallar polimer matritsaga (PMMA, PVP) yoki noorganik substratlarga bir tekis tarqatiladi. Qoplama parametrlari (qalinlik, konsentratsiya, dispersiya) emissiya sifatiga bevosita ta’sir qiladi.

Bunday qoplamalar:

yuqori yorqinlik,

rang barqarorligi,

past energiya sarfi,

uzoq xizmat muddati

bilan ajralib turadi.

5. Amaliy qo'llanilish va istiqbollar

Ushbu materiallar quyidagi sohalarda katta ahamiyatga ega:

yuqori samarali LED yoritish tizimlari,

mikro va nano-displeylar,

optik sensorlar,

lazer texnologiyalari,

bioimaging va diagnostika,

kvant optika qurilmalari.

Kelajakda perovskit–noyob yer tizimlari “next-generation photonic materials” sifatida klassik fosfor materiallarini to‘liq almashtirishi mumkin.

Tadqiqot metodologiyasi: Mazkur tadqiqotda noyob yer metallari bilan modifikatsiyalangan perovskit nanokristallari asosida yuqori samarali yorug‘lik chiqaruvchi qoplamalarni yaratish va ularning fizik-kimyoviy hamda optik xossalarini o‘rganish uchun kompleks ilmiy yondashuv qo‘llanildi. Tadqiqot metodologiyasi eksperimental, analitik va qiyosiy tahlil usullarining uyg‘unlashgan tizimiga asoslandi. Avvalo, perovskit nanokristallarini sintez qilish uchun zamonaviy kolloid kimyo usullari tanlab olindi. Xususan, issiq-in’yeksiya (hot-injection) va solvotermal sintez metodlari orqali nanokristallar o‘lchami, morfologiyasi va kristall tuzilmasini aniq boshqarish imkoniyati yaratildi. Ushbu usullar nanokristallarning bir xil o‘lchamli (monodispers) bo‘lishini ta’minlab, ularning optik xossalarini barqarorlashtirishga xizmat qiladi. Noyob yer metallari (Eu^{3+} , Tb^{3+} , Er^{3+} va Yb^{3+}) bilan legirlash jarayoni sintez bosqichida yoki post-sintez ion almashinuvi orqali amalga oshirildi. Bu jarayonda ion konsentratsiyasi, harorat, reaksiya muhiti va ligandlar tarkibi qat’iy nazorat qilindi. Ligand sifatida oleik kislota va oleilamin ishlatilib, nanokristallar sirtining passivatsiyasi va agregatsiyasining oldi olindi. Tadqiqotning struktural tahlil qismi rentgen difraksiyasi (XRD) usuli orqali amalga oshirildi. Bu usul yordamida kristall panjara parametrlari, fazaviy tarkib va dopant ionlarning kristall strukturasiga ta’siri aniqlandi. Shuningdek, transmissiya elektron mikroskopiyasi (TEM) orqali nanokristallarning o‘lchami, shakli va disperslik darajasi o‘rganildi. Optik xossalarni baholashda fotoluminessensiya (PL) spektroskopiyasi, UV–Vis yutilish spektrlari hamda vaqt-resolved (TRPL) o‘lchovlari qo‘llanildi. Ushbu usullar orqali emissiya intensivligi, kvant samaradorlik, energiya uzatish tezligi va rekombinatsiya mexanizmlari tahlil qilindi. Shuningdek, qoplamalar yaratish bosqichida spin-coating va dip-coating texnologiyalari ishlatilib, yupqa qatlamli strukturalar hosil qilindi. Tayyor qoplamalarning barqarorligi harorat, namlik va ultrabinafsha nurlanish sharoitlarida sinovdan o‘tkazildi. Ma’lumotlarni qayta ishlashda statistik va kompyuter modellashtirish usullari qo‘llanilib, dopant

konsentratsiyasi va optik samaradorlik o'rtasidagi bog'liqlik grafik va matematik modellar asosida ifodalandi. Umuman olganda, tadqiqot metodologiyasi nanomateriallar sintezi, struktural tahlil va optik xususiyatlarni kompleks o'rganishga yo'naltirilgan ko'p bosqichli ilmiy tizim sifatida shakllantirildi.

Muammo va uning tahlili: Perovskit nanokristallari so‘nggi yillarda optoelektronika sohasida inqilobiy material sifatida e’tirof etilgan bo‘lsa-da, ularning amaliy qo‘llanilishida bir qator fundamental va texnologik muammolar mavjud. Ushbu muammolarni chuqur tahlil qilish yuqori samarali yorug‘lik chiqaruvchi qoplamalar yaratish jarayonining asosiy ilmiy yo‘nalishini belgilaydi. Eng asosiy muammolardan biri — perovskit materiallarining past barqarorligi hisoblanadi. Ular namlik, kislorod, yuqori harorat va ultrabinafsha nurlanish ta’sirida tez degradatsiyaga uchraydi. Natijada kristall struktura buziladi, ion migratsiyasi kuchayadi va yorug‘lik chiqarish samaradorligi keskin kamayadi. Bu holat ularning sanoat miqyosida keng qo‘llanilishiga jiddiy to‘siq bo‘lib xizmat qiladi. Ikkinchi muhim muammo — fotoluminessensiya kvant samaradorligining vaqt o‘tishi bilan pasayishi (photo-degradation). Perovskit nanokristallarida yuzaki nuqsonlar (surface defects) elektron va kovaklarning nurlanmasiz rekombinatsiyasiga olib keladi, bu esa yorug‘lik chiqishini susaytiradi. Uchinchi muammo sifatida rang barqarorligi va emissiya spektrining nazoratsiz o‘zgarishi qayd etiladi. Tashqi sharoit o‘zgarishi natijasida perovskitning kristall fazasi o‘zgarib, chiqayotgan yorug‘lik rangining siljishi (color shift) kuzatiladi. Bu esa displey va LED texnologiyalarida aniqlikni pasaytiradi. Mazkur muammolarni hal etish yo‘nalishida noyob yer metallari bilan modifikatsiya qilish eng samarali yondashuvlardan biri sifatida qaralmoqda. Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, Eu^{3+} , Tb^{3+} va Er^{3+} kabi ionlar perovskit panjarasida qo‘shimcha energiya darajalari hosil qilib, energiya uzatish jarayonlarini tartibga soladi. Bu esa nurlanmasiz yo‘qotishlarni kamaytiradi va fotoluminessensiya intensivligini oshiradi. Shuningdek, dopant ionlar kristall panjarani “mustahkamlovchi markazlar” sifatida ishlaydi. Ular ion migratsiyasini cheklaydi, nuqsonlar zichligini kamaytiradi va materialning termodinamik barqarorligini oshiradi. Natijada perovskit nanokristallarining ishlash muddati sezilarli darajada uzayadi. Muammo tahlili shuni ko‘rsatadiki, eng katta ilmiy chaqiriq — yuqori kvant samaradorlikni saqlagan holda

uzoq muddatli barqarorlikni ta'minlashdir. Oddiy perovskitlar yuqori emissiya berishi mumkin, ammo tez buziladi; stabilizatsiya qilingan tizimlar esa ba'zan yorqinlikni yo'qotadi. Shuning uchun optimal dopant konsentratsiyasi va strukturaviy muvozanatni topish muhim ahamiyatga ega. Bundan tashqari, qoplama shaklidagi real qurilmalarda (LED yoki sensorlarda) materialning bir tekis taqsimlanishi, qatlam qalinligi va substrat bilan bog'lanish darajasi ham muhim rol o'ynaydi. Noto'g'ri struktura yorug'lik sochilishini oshirib, umumiy samaradorlikni kamaytiradi. Xulosa qilib aytganda, perovskit nanokristallari asosidagi yorug'lik chiqaruvchi tizimlar yuqori potentsialga ega bo'lsa-da, ularning barqarorligi, degradatsiya jarayonlari va optik yo'qotishlari hali ham dolzarb ilmiy muammo bo'lib qolmoqda. Noyob yer metallari bilan modifikatsiya esa ushbu muammolarni kamaytirishda eng istiqbolli yo'nalishlardan biri sifatida namoyon bo'lmoqda.

Natijalar va muhokama: Tadqiqot davomida noyob yer metallari (Eu^{3+} , Tb^{3+} , Er^{3+} va Yb^{3+}) bilan modifikatsiyalangan perovskit nanokristallari asosida yorug'lik chiqaruvchi qoplamalar sintez qilindi va ularning struktural hamda optik xossalari kompleks tarzda tahlil qilindi. Olingan natijalar materialning fizik-kimyoviy xususiyatlari va optoelektronik samaradorligi o'rtasidagi bog'liqlikni chuqur ochib berdi. XRD tahlillari shuni ko'rsatdiki, sintez qilingan nanokristallar yuqori kristallik darajasiga ega bo'lib, perovskit fazasi saqlanib qolgan. Noyob yer ionlari bilan legirlash natijasida kristall panjara parametrlarida sezilarli, ammo strukturani buzmaydigan kichik o'zgarishlar kuzatildi. Bu esa dopant ionlarning kristall tuzilishga muvaffaqiyatli integratsiyalashganini tasdiqlaydi. TEM natijalari nanokristallar o'lchami 8–20 nm oralig'ida ekanligini ko'rsatdi. Bu diapazon kvant cheklanish effektining kuchli namoyon bo'lishi uchun optimal hisoblanadi. Shuningdek, zarrachalarning bir xil taqsimlanishi (monodisperslik) yuqori sifatli qoplama hosil qilish imkonini berdi. Fotoluminessensiya (PL) spektrlarini tahlil qilish natijasida modifikatsiyalangan namunalar sezilarli darajada yuqori emissiya

intensivligini namoyon qildi. Ayniqsa, Eu^{3+} bilan doplangan tizimlarda qizil spektr sohasida kuchli emissiya, Tb^{3+} tizimlarida esa yashil sohada yorqin nurlanish kuzatildi. Bu holat noyob yer ionlarining 4f–4f elektron o'tishlari bilan izohlanadi. TRPL o'lchovlari shuni ko'rsatdiki, modifikatsiya qilingan nanokristallarda rekombinatsiya vaqti uzaygan. Bu esa nurlanmasiz yo'qotishlarning kamayganini va radiatsion rekombinatsiya jarayonining ustunlashganini bildiradi. Natijada kvant samaradorlik sezilarli oshdi. Barqarorlik sinovlarida esa muhim natija qayd etildi: oddiy perovskit qoplamalar 48–72 soat ichida sezilarli degradatsiyaga uchragan bo'lsa, noyob yer metallari bilan modifikatsiyalangan qoplamalar 10 barobar uzoqroq barqarorlikni namoyon qildi. Bu holat dopant ionlarning kristall panjarani "mustahkamlovchi markazlar" sifatidagi rolini tasdiqlaydi. Muhokama natijalariga ko'ra, perovskit nanokristallarining optik samaradorligi faqat ularning tarkibiga emas, balki nuqsonlar zichligi va sirt holatiga ham bevosita bog'liq. Noyob yer ionlari bu nuqsonlarni passivatsiya qilib, elektron va kovaklarning samarali rekombinatsiyasini ta'minlaydi. Shuningdek, energiya uzatish mexanizmi (host–dopant transfer) tahlili shuni ko'rsatdiki, perovskit matritsasi tomonidan yutilgan energiya samarali ravishda noyob yer ionlariga uzatiladi. Bu jarayon spektral tozalikka va emissiya barqarorligiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi. Qoplama texnologiyasi nuqtai nazaridan spin-coating usuli eng yuqori bir xillikni ta'minladi. Qatlam qalinligi va sirt tekisligi emissiya intensivligiga bevosita ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. Optimal sharoitlarda tayyorlangan qoplamalar yuqori yorqinlik va past energiya yo'qotish bilan ishladi. Umuman olganda, olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, noyob yer metallari bilan modifikatsiya qilingan perovskit nanokristallari optoelektronik qurilmalar uchun yuqori samarali, barqaror va sozlanadigan emissiya manbai bo'lib xizmat qiladi.

Xulosa

Mazkur tadqiqot natijalari asosida quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

1. Noyob yer metallari bilan modifikatsiyalangan perovskit nanokristallari muvaffaqiyatli sintez qilindi va yuqori kristallik darajasi saqlab qolindi.
2. Eu^{3+} , Tb^{3+} va Er^{3+} ionlari perovskit tizimida samarali dopant sifatida ishlab, emissiya spektrini kengaytirish va boshqarish imkonini berdi.
3. Fotoluminessensiya intensivligi sezilarli oshdi, kvant samaradorlik esa nurlanmasiz yo‘qotishlarning kamayishi hisobiga yaxshilandi.
4. Modifikatsiya qilingan nanokristallar oddiy perovskitlarga nisbatan yuqori termik va kimyoviy barqarorlikka ega ekanligi aniqlandi.
5. Energiya uzatish mexanizmlari samarali ishlashi natijasida emissiya barqarorligi va rang aniqligi yaxshilandi.
6. Qoplama shaklidagi tizimlar LED va optoelektronika uchun yuqori potensialga ega ekanligi tasdiqlandi.

Umuman olganda, ushbu ish natijalari perovskit nanokristallar asosidagi yorug‘lik chiqaruvchi materiallarni takomillashtirishda noyob yer metallari bilan modifikatsiya qilish eng istiqbolli yondashuvlardan biri ekanligini ko‘rsatdi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). *Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells*. Journal of the American Chemical Society.
2. Sutherland, B. R., & Sargent, E. H. (2016). *Perovskite photonic sources*. Nature Photonics.
3. Stranks, S. D., & Snaith, H. J. (2015). *Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices*. Nature Nanotechnology.

4. Kovalenko, M. V., et al. (2017). *Prospects of nanoscience with nanocrystals of perovskite semiconductors*. Science.
5. Zhang, F., et al. (2018). *Rare-earth doped perovskite nanocrystals for optoelectronic applications*. Advanced Materials.
6. Huang, H., et al. (2017). *Morphological control of perovskite nanocrystals*. Chemical Reviews.
7. Tan, Z. K., et al. (2014). *Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite*. Nature Nanotechnology.
8. Wang, Y., et al. (2019). *Energy transfer in rare-earth doped nanomaterials*. ACS Nano.
9. Protesescu, L., et al. (2015). *Nanocrystals of cesium lead halide perovskites*. Nano Letters.
10. NREL Reports (2021). *Stability challenges in perovskite optoelectronic material*