



YARIMO‘TKAZGICH KVANT NUQTALARIDAGI ELEKTRON HOLATLAR VA OPTIK XUSUSIYATLARNING NAZARIY TAHLILI

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23356322>

Ibroximova Shaxlo Abduqodir qizi

Muassasa: Farg‘ona davlat universiteti

Annotatsiya: Maqolada yarimo‘tkazgich kvant nuqtalaridagi elektron holatlar va optik javobning o‘lcham, material parametrlari hamda sirt holatlariga bog‘liqligi nazariy jihatdan tahlil qilinadi. Kvant nuqta uch o‘lchamda tashuvchilarni cheklovchi nol o‘lchamli geterotuzilma sifatida qaraladi; bunday cheklanish uzluksiz zonalar o‘rniga diskret sathlarning shakllanishiga olib keladi. Effektiv massa yaqinlashuvi va eksiton Kulon tuzatmasiga tayangan hisobiy sxema CdSe-tipidagi sferik nuqtalar uchun qo‘llanildi. Radius 2,0 nm dan 4,0 nm gacha oshganda optik o‘tish energiyasi 2,54 eV dan 1,91 eV gacha kamayishi, mos ravishda yutilish va nurlanish qirrasi uzunroq to‘lqinlarga siljishi ko‘rsatildi. Natijalar R^{-2} qonunli kvant-cheklanish hadi kichik o‘lchamlarda ustun ekanini, elektron-teshik tortishuvi esa energiyani pasaytiruvchi R^{-1} tuzatma berishini ko‘rsatadi. Sirt tuzoqlari, dielektrik nomuvofiqlik, shakl anizotropiyasi va yadro-qobiq arxitekturasini nurlanish samaradorligini belgilovchi ikkilamchi, ammo muhim omillar sifatida muhokama qilinadi. Ishning amaliy qiymati QLED, fotodetektor, lazer va bir fotonli manbalarda spektral javobni maqsadli loyihalash mezonlarini umumlashtirishidir.

Kalit so‘zlar: kvant nuqta, kvant cheklanishi, elektron holatlar, eksiton, fotoluminessensiya, effektiv massa, yadro-qobiq, optoelektronika.

Аннотация: В статье теоретически анализируется зависимость электронных состояний и оптического отклика полупроводниковых квантовых точек от размера, параметров материала и поверхностных состояний. Квантовая точка рассматривается как нульмерная гетероструктура с трехмерным ограничением носителей; такое ограничение приводит к формированию дискретных уровней вместо непрерывных зон. Расчетная схема на основе приближения эффективной массы и кулоновской поправки экситона применена к сферическим точкам типа CdSe. При увеличении радиуса от 2,0 до 4,0 нм энергия оптического перехода уменьшается от 2,54 до 1,91 эВ, а край поглощения и излучения смещается к более длинным волнам. Результаты показывают, что вклад квантового ограничения, пропорциональный R^{-2} , доминирует при малых размерах, тогда как притяжение электрона и дырки дает понижающую поправку порядка R^{-1} . Обсуждаются поверхностные ловушки, диэлектрическое несоответствие, анизотропия формы и архитектура ядро-оболочка как факторы, определяющие эффективность излучения.



Практическая значимость работы состоит в обобщении критериев целевого проектирования спектрального отклика для QLED, фотодетекторов, лазеров и однофотонных источников.

Ключевые слова: *квантовая точка, квантовое ограничение, электронные состояния, экситон, фотолюминесценция, эффективная масса, ядро-оболочка, оптоэлектроника.*

Abstract: *This article presents a theoretical analysis of the dependence of electronic states and optical response in semiconductor quantum dots on size, material parameters and surface states. A quantum dot is treated as a zero-dimensional heterostructure that confines carriers in all three spatial directions; this confinement transforms continuous bands into discrete levels. A computational scheme based on the effective-mass approximation and an excitonic Coulomb correction is applied to spherical CdSe-like dots. When the radius increases from 2.0 to 4.0 nm, the predicted optical-transition energy decreases from 2.54 to 1.91 eV, and the absorption and emission edge shifts to longer wavelengths.*

The results show that the R^{-2} quantum-confinement term dominates at small sizes, whereas electron-hole attraction produces a lowering R^{-1} correction. Surface traps, dielectric mismatch, shape anisotropy and core-shell architecture are discussed as secondary but decisive factors controlling radiative efficiency. The practical value of the study is the consolidation of design criteria for tailoring spectral response in QLEDs, photodetectors, lasers and single-photon sources.

Keywords: *quantum dot, quantum confinement, electronic states, exciton, photoluminescence, effective mass, core-shell, optoelectronics.*

KIRISH

Yarimo'tkazgich kvant nuqtalari (QN) elektron va teshiklar harakati uch fazoviy yo'nalishda cheklangan nanokristall tizimlardir. Ularning xarakterli o'lchami tashuvchining de Broyl to'lqin uzunligi yoki eksiton Bor radiusi bilan taqqoslanadigan darajaga kelganda, hajmiy kristallga xos uzluksiz energiya zonalari diskret qobiqsimon sathlarga ajraladi. Shu sababli QNlar ko'pincha "sun'iy atomlar" deb tavsiflanadi: energiya sathlari atomdagidek diskret bo'lsa-da, ularning o'rni kimyoviy tarkib, geometrik o'lcham

va tashqi muhit orqali boshqarilishi mumkin. Brus (1984) taklif qilgan soddalashtirilgan model kvant-cheklanish va elektron-teshik o'zaro ta'sirining optik bo'shliqqa qo'shgan hissasini aniq ajratib berdi.

QNlar an'anaviy hajmiy yarimo'tkazgichlardan ikki muhim jihati bilan farq qiladi. Birinchidan, holatlar zichligi delta-simon qatorga yaqinlashadi, buning oqibatida yutilish qirralari va nurlanish spektrlari material parametrlari bilan birga o'lcham taqsimotiga ham sezgir bo'ladi. Ikkinchidan, to'lqin funksiyalarining kichik hajmda ustma-ust



tushishi oshadi va Kulon, almashinuv, Auger hamda sirt bilan bog'liq jarayonlar kuchayadi. Natijada radiativ rekombinatsiya, ko'p-eksiton holatlari va no-radiativ yo'qotishlar bir-biri bilan raqobatlashadi (Klimov, 2007).

Kolloid QNlarda o'lchamni sintez jarayonida boshqarish mumkinligi ko'rinadigan va yaqin IK sohalarda sozlanadigan rang manbalarini olishga imkon berdi. Epitaksial InAs/GaAs QNlar esa lazerlar va kvant-optik bir fotonli emitterlar uchun muhim platformaga aylandi. Zamonaviy yadro-qobiq, gradient qobiq va II-tip geterotuzilmalar sirt defektlarini passivatsiyalash, tashuvchilarni fazoviy ajratish yoki aksincha ularning qoplanishini kuchaytirish orqali optik javobni muhandislik yo'li bilan sozlaydi. Shu bois elektron holatlar nazariyasi material tanlashdan oldingi asosiy loyihalash vositasidir.

Mavzuga oid manbalarda ko'p zonali k·p, empirik tight-binding, pseudopotensial hamda ab initio yondashuvlar chuqur rivojlangan. Biroq tez baholash va o'quv-izlanish maqsadlarida effektiv massa yaqinlashuvi hanuz foydali: u radius, effektiv massalar va dielektrik singdiruvchanlikning nisbiy rolini fizik jihatdan shaffof ko'rsatadi. Mazkur ishning maqsadi QN elektron holatlari shakllanishining asosiy mexanizmlarini tizimlashtirish, CdSe-tipidagi model misolida o'lchamga bog'liq optik o'tishni baholash va olingan qonuniyatlarning optik qurilmalar uchun oqibatlarini tahlil qilishdir.

Tadqiqot vazifalari quyidagicha belgilandi: kuchli cheklanish rejimini tavsiflovchi modelni tanlash; elektron va teshik cheklanish energiyalarini eksiton tuzatmasi bilan birgalikda hisoblash; natijalarni energiya va to'lqin uzunligi ko'rinishida taqqoslash; sirt holatlari, qobiq materiali va shaklning spektral kenglik hamda kvant chiqishiga ta'sirini muhokama qilish. Ishning yangiligi eksperimental da'vo emas, balki ideal model natijalarini real QN arxitekturalaridagi yo'qotish kanallari bilan bir tahliliy zanjirda bog'lashidadir.

Tadqiqot materiallari va metodlari

Tadqiqot hisobiy-nazariy xarakterga ega. Modellash obyekti sifatida sferik, cheklovchi potentsiali yuqori deb qabul qilingan CdSe-tipidagi QN tanlandi. Bu tanlovning sababi CdSe nanokristallari uchun optik spektrlar va effektiv parametrlar keng o'rganilganidir. Hisoblashda hajmiy taqiqlangan zona $E_g = 1,74$ eV, elektron uchun effektiv massa $m_e^* = 0,13m_0$, teshik uchun $m_h^* = 0,45m_0$ hamda nisbiy dielektrik singdiruvchanlik $\epsilon = 9,5$ qabul qilindi. Ushbu qiymatlar idealizatsiyalangan baholash uchun xizmat qiladi; ularning o'lcham, temperatura va kristall fazaga bog'liq aniqlashtirilishi modelning keyingi bosqichida talab qilinadi.

Optik o'tish energiyasi uch hissadan tuzildi: hajmiy taqiqlangan zona, elektron va teshikning sferik qutidagi kvant-cheklanish energiyasi hamda elektron-teshik tortishishini ifodalovchi birinchi tartibli eksiton tuzatmasi. Cheklanish



hissasi radiusning kvadratiga teskari, Kulon tuzatmasi esa radiusga teskari bog'liq. Demak, radius kichrayganda musbat kinetik hissa tezroq ortadi va samarali optik bo'shliq kengayadi. Hisobda polaron, valensiya zonasining murakkab degeneratsiyasi, sirt zaryadlari, kuchli dielektrik polarizatsiya va finite-barrier effektlari kiritilmadi.

Radiuslar 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 va 4,0 nm nuqtalarda olingan. Har bir radius uchun o'tish energiyasi eV birlikda aniqlanib, undan ekvivalent vakuum to'lqin uzunligi $\lambda = 1240/E$ formula orqali hisoblandi. Natijalar o'lchamning monoton ta'sirini aniq ko'rsatish uchun ikki o'nlik aniqlikda berildi. Tahlil kuchli cheklanish rejimiga yo'naltirilgan: ya'ni nuqta radiusi CdSe eksitonining xarakterli Bohr radiusi bilan teng yoki undan kichik sohada.

Nazariy natijalarni talqin qilishda adabiyotlar qiyosiy tahlili ishlatildi. Xususan, Brus modeli bilan eksitonli

ko'p-zarracha jarayonlari, yadro-qobiq passivatsiyasi, kolloid QNlarda zaryad tashish va QLEDlardagi samaradorlik cheklovlariga oid sharhlar solishtirildi. Metodning ishonchlilik chegarasi ham alohida hisobga olindi: hisoblangan sonlar spektral maksimumning universal, aniq tajribaviy qiymati emas, balki tarkib va radius o'zgarishidan keladigan asosiy trendni ko'rsatuvchi baholardir.

Natijalar

Hisoblashda radius kichrayishi bilan optik o'tish energiyasi sezilarli ortishi aniqlandi. 2,0 nm radiusda cheklanish hissasi 0,93 eV ga yaqin bo'lib, eksiton tortishishi uni taxminan 0,14 eV kamaytiradi. 4,0 nm radiusda esa mos hissalar 0,23 eV va 0,07 eV atrofida. Shunday qilib, ikkala tuzatma ham o'lchamga bog'liq bo'lsa-da, kichik radiuslarda R^{-2} hadining ustunligi spektrning ko'k siljishini belgilaydi.

1-jadval. CdSe-tipidagi sferik kvant nuqtalar uchun ideal model natijalari

Radius, nm	Cheklanish hissasi, eV	Eksiton tuzatmasi, eV	Optik o'tish, eV	λ , nm
2,0	0,93	-0,14	2,54	489
2,5	0,60	-0,11	2,23	557
3,0	0,41	-0,09	2,06	601
3,5	0,30	-0,08	1,97	630
4,0	0,23	-0,07	1,91	651

1-jadvaldagi qiymatlar asosida 2,0 nm dan 4,0 nm gacha bo'lgan oraliqda asosiy o'tish energiyasi 0,63 eV ga pasayadi. Bu o'zgarish emissiya rangining ko'k-yashil sohadan qizil sohaga tomon siljishini anglatadi. Real namunalarda spektr maksimumi ligandlar, qobiq, strain,

temperatura va ansamblning o'lcham bo'yicha dispersiyasi sababli ushbu qiymatlardan farq qilishi mumkin. Biroq trendning yo'nalishi va asosiy miqyosi kvant-cheklanish fizikasi bilan barqaror belgilanadi.



Diskret elektron sathlari s-, p-, d-qobiqlar ko‘rinishida tashkil topadi. Eng past ruxsat etilgan optik o‘tish odatda $1S_e-1S_h$ juftligi bilan bog‘lanadi; yuqoriroq energiyalarda 1P va aralash holatlarga o‘tishlar kuzatiladi. Sferik simmetriya buzilganda yoki valensiya zonasi og‘ir va yengil teshik komponentlariga ajralganda tanlash qoidalari hamda polarizatsion xususiyatlar o‘zgaradi. Demak, o‘lcham nafaqat bo‘shliq energiyasini, balki osillyator kuchi va spektral chiziqlarning tuzilishini ham belgilaydi.

Yadro-qobiq konstruktsiyasida qobiqning katta taqiqlangan zonasi

tashuvchilarni yadro ichiga siqib, sirtga yetib borishini kamaytiradi.

I-tip CdSe/ZnSga o‘xshash arxitekturadagi bunday passivatsiya no-radiativ sirt tuzoqlarini kamaytirib, fotoluminessensiya kvant chiqishini oshiradi. II-tip strukturalarda esa elektron va teshik turli sohalarda lokalizatsiyalanishi mumkin; bu o‘tish energiyasini qizil tomonga siljitadi hamda rekombinatsiya vaqtini uzaytiradi. Shuning uchun bir xil yadro radiusi turli qobiq bilan bir xil spektral javob bermaydi.

2-jadval. Elektron va optik javobni boshqaruvchi asosiy parametrlar

Parametr	Elektron holatlarga ta'sir	Optik kuzatiladigan oqibat
Yadro radiusi	Sathlar oralig'i R^{-2} qonun bilan o‘zgaradi	Kichik radius: ko‘k siljish; katta radius: qizil siljish
Effektiv massa	Yengil massa cheklanish energiyasini oshiradi	O‘tish energiyasi va yutilish qirrasini siljiydi
Dielektrik muhit	Kulon va tasvir-zaryad hissalarini o‘zgartiradi	Eksiton bog‘lanishi, stoks siljishi va chiziq kengligi o‘zgaradi
Sirt holatlari	Tuzoqlar lokal holatlar yaratadi	So‘nish, keng spektr yoki no-radiativ rekombinatsiya
Qobiq materiali	To‘siq balandligi va tashuvchi lokalizatsiyasini belgilaydi	Kvant chiqishi, umr va spektr barqarorligi oshadi yoki o‘zgaradi

Muhokama

Olingan natijalar QN optik xususiyatlarining bosh manbai geometrik cheklanish ekanini tasdiqlaydi. Radius ikki marta kamayganda kvant-cheklanish

energiyasi taxminan to‘rt marta oshishi dizaynning juda sezgir ekanini ko‘rsatadi. Shu bois sintezda radiusning kichik dispersiyasi muhim: hatto tor o‘lcham taqsimoti ham ansambl spektrini



kengaytiradi, keng taqsimot esa individual nuqtalardagi diskret o'tishlarni o'rtachalab, rangning tozaligini pasaytiradi. Monodispers nanokristallar sintezining ahamiyati aynan shu bog'lanishdan kelib chiqadi.

Brus tipidagi modelning afzalligi shundaki, u spektral siljishni uch sodda fizik unsurga ajratadi. Biroq u real QNning barcha xususiyatlarini bermaydi. Birinchidan, cheklovchi potensial cheksiz deb olingan; amalda to'lqin funksiyasi matrisa yoki qobiqqa kirib boradi. Ikkinchidan, dielektrik chegaradagi polarizatsiya tasvir zaryadlarini hosil qilib, elektron-teshik o'zaro ta'sirini o'zgartiradi. Uchinchidan, valensiya zonasining ko'p-komponentli tabiati, ayniqsa III–V va wurtzit II–VI materiallarida, eksitonning nozik tuzilishi va optik anizotropiyasiga olib keladi. Shuning uchun yuqori aniqlik zarur bo'lganda ko'p zonali k·p, tight-binding yoki atomistik pseudopotensial hisoblari maqsadga muvofiq.

Eksitonli effektlar nazariy tahlilning markaziy qismidir. Elektron va teshik bir juft sifatida paydo bo'lgach, ularning to'lqin funksiyalari qoplanishi radiativ o'tish ehtimolini belgilaydi. Cheklanish kuchaysa, qoplanish ko'pincha oshadi, ammo sirt yoki interfeysga yaqin lokalizatsiya no-radiativ yo'lni ham kuchaytirishi mumkin. Yorug' va qorong'i eksiton holatlarining energiya bo'yicha mayda ajralishi past temperaturada lyuminessensiya umrini keskin o'zgartiradi. Ko'p eksitonlarda esa Coulomb korrelyatsiyalar va Auger

rekombinatsiyasi optik kuchaytirish, lazerlash va zaryad ko'paytirish istiqbollarini bir vaqtning o'zida ham cheklaydi, ham boyitadi.

Sirt kimyosi hisobiy idealizatsiyadan real qurilmaga o'tishdagi eng muhim omildir. Koordinatsiyasi to'yinmagan atomlar yoki oksidlangan nuqsonlar energiya bo'shlig'i ichida tuzoq holatlarini hosil qiladi. Bu holatlar tashuvchini ushlab qolib, fotolyuminessensiyaning pasaytirishi, "blinking" yoki spektral diffuziyaga sabab bo'lishi mumkin. Keng taqiqlangan zonali qobiq bilan passivatsiyalash ushbu tuzoqlarni kamaytiradi. Dabbousi va hamkorlarining CdSe/ZnS tizimidagi ishlari yadro-qobiq interfeysi nurlanish samaradorligini oshirishini ko'rsatgan; keyingi tadqiqotlar qobiq qalinligi va strainni boshqarish orqali Auger so'nishini ham kamaytirish mumkinligini rivojlantirdi.

QLEDlar nuqtai nazaridan tor nurlanish chizig'i va rangning o'lcham orqali sozlanishi asosiy afzallikdir.

Biroq qurilma samaradorligi faqat yuqori fotolyuminessensiya kvant chiqishiga teng emas. Elektron va teshik injeksiyasi muvozanati, zaryadlangan nuqtalarda Auger yo'qotishlari, qatlamlararo energiya sathlari va yorug'likni chiqarib olish koeffitsienti ham hal qiluvchi hisoblanadi. So'nggi sharhlar ayniqsa kadmiysiz InP QNlari hamda ko'k QLEDlarning umr muammosi to'liq yechilmaganini qayd etadi. Demak, QNning bir zarracha darajasidagi elektron tuzilishi qurilma miqyosidagi qatlam muhandisligi bilan birga ko'rilishi zarur.



Fotodetektor va quyosh elementlarida boshqa muvozanat paydo bo'ladi. Bu qurilmalarda kuchli yutilish va tashuvchini tez ajratish kerak, lekin elektron-teshik juftining juda kuchli bog'lanishi erkin zaryadlar hosil bo'lishini qiyinlashtirishi mumkin. II-tip geterotuzilmalar va QN qattiq jismlaridagi ligand almashinuvi zaryad tashishni yaxshilaydi, ammo sirt defektlari oshishi xavfi bor. Shu sababli elektron holatlarni boshqarish faqat spektrni belgilash emas, balki rekombinatsiya va transport vaqt shkalalarini uyg'unlashtirish masalasidir.

Kvant-optik ilovalarda bir QNning diskret holatlari bir fotonli manba sifatida ishlatiladi. Bunda spektral diffuziyaning pastligi, chiziqli kengligining kichikligi, polarizatsiya nazorati va fotonlarning ajralmasligi muhim. Epitaksial QNlarni fotonik kavitalar bilan bog'lash spontan emissiyani Purcell effekti orqali kuchaytirishi yoki kuchli bog'lanish rejimiga olib borishi mumkin. Koloid QNlarda esa qayta ishlash qulayligi va rangni keng sozlash ustun, biroq blinking hamda ansambl bir jinsliliigi muammolari talabchan kvant fotonika uchun asosiy to'siqlardir.

Tadqiqot natijalarining cheklovi shundaki, hisob faqat bir zarrachali effektiv massa modeliga asoslangan va tajribaviy spektrlar bilan bevosita fit qilinmagan. Shunga qaramay, radiusga bog'liq 489–651 nm oralig'idagi siljish fizik jihatdan mantiqiy va CdSe QNlari uchun ma'lum bo'lgan o'lcham-sezuvchan javob bilan mos trend beradi. Kelgusi ishlarda finite-barrier model,

dielektrik tasvir kuchlari, valensiya zonasining Luttinger parametrlari, temperatura va ligandga bog'liq sirt holatlarini qo'shish lozim. Shunda model nafaqat trend, balki konkret arxitektura uchun prognoz bera oladi.

Xulosa

Nazariy tahlil yarimo'tkazgich QNlarida elektron va teshik holatlari uch o'lchamli kvant cheklanishi sabab diskret sathlarga ajralishini ko'rsatdi. CdSe-tipidagi sferik modelda radius 2,0 nm dan 4,0 nm gacha ortganda asosiy optik o'tish 2,54 eV dan 1,91 eV gacha kamaydi; bu emissiyaning taxminan 489 nm dan 651 nm gacha qizil tomonga siljishiga mos keladi. Natijaning fizik sababi cheklanish energiyasining R^{-2} , eksiton tortishishining esa R^{-1} bog'liqligidadir.

Optik xususiyatlar faqat yadro radiusi bilan belgilanmaydi. Effektiv massalar, dielektrik muhit, shakl, sirt tuzoqlari va yadro-qobiq geterointerfeysi optik bo'shliq, chiziqli kengligi, radiativ umr va kvant chiqishini o'zgartiradi. Qobiq bilan passivatsiyalash no-radiativ yo'qotishlarni kamaytirishning asosiy yo'li, II-tip arxitekturalar esa spektr va tashuvchilar ajralishini boshqarish vositasi sifatida baholanadi.

Amaliy jihatdan, QLED va lazerlar uchun o'lcham monodispersligi, sirt passivatsiyasi hamda Auger jarayonlarini susaytirish ustuvor; fotodetektorlar uchun esa yutilish, zaryad ajralishi va tashish o'rtasidagi muvozanat muhimdir. Kelgusida ko'p zonali va atomistik hisoblarni vaqt-resolved spektroskopiya bilan birlashtirish QNlar uchun "tarkib–



tuzilish–xossa” xaritasini yuqori aniqlikda
qurishga yordam beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

KITOBLAR

1. Alivisatos, A. P. (1996). Perspectives on the physical chemistry of semiconductor nanocrystals. *Journal of Physical Chemistry*, 100(31), 13226–13239. <https://doi.org/10.1021/jp9535506>
2. Klimov, V. I. (Ed.). (2010). *Nanocrystal quantum dots* (2nd ed.). CRC Press.
- Harrison, P., & Valavanis, A. (2016). *Quantum wells, wires and dots: Theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures* (4th ed.). Wiley.

MAQOLALAR

1. Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L., & Brus, L. E. (1990). The quantum mechanics of larger semiconductor clusters (“quantum dots”). *Annual Review of Physical Chemistry*, 41, 477–496. <https://doi.org/10.1146/annurev.pc.41.100190.002401>
2. Brus, L. E. (1984). Electron–electron and electron–hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. *The Journal of Chemical Physics*, 80(9), 4403–4409. <https://doi.org/10.1063/1.447218>
3. Dabbousi, B. O., Rodriguez-Viejo, J., Mikulec, F. V., Heine, J. R., Mattoussi, H., Ober, R., Jensen, K. F., & Bawendi, M. G. (1997). (CdSe)ZnS core-shell quantum dots: Synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites. *Journal of Physical Chemistry B*, 101(46), 9463–9475. <https://doi.org/10.1021/jp971091y>
4. Efros, A. L., & Efros, A. L. (1982). Interband absorption of light in a semiconductor sphere. *Soviet Physics Semiconductors*, 16, 772–775.
5. Kagan, C. R., Murray, C. B., & Bawendi, M. G. (1996). Long-range resonance transfer of electronic excitations in close-packed CdSe quantum-dot solids. *Physical Review B*, 54(12), 8633–8643. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.8633>
6. Klimov, V. I. (2007). Spectral and dynamical properties of multiexcitons in semiconductor nanocrystals. *Annual Review of Physical Chemistry*, 58, 635–673. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.58.032806.104537>
7. Liu, M., Yazdani, N., Yarema, M., Jansen, M., Wood, V., & Sargent, E. H. (2021). Colloidal quantum dot electronics. *Nature Electronics*, 4, 548–558. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00632-7>
8. Marzin, J.-Y., Gérard, J.-M., Izraël, A., Barrier, D., & Bastard, G. (1994). Photoluminescence of single InAs quantum dots obtained by molecular beam epitaxy. *Physical Review Letters*, 73(5), 716–719. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.716>



9. Mittelstädt, A., Schliwa, A., & Klenovský, P. (2022). Modeling electronic and optical properties of III–V quantum dots—selected recent developments. *Light: Science & Applications*, 11, 17. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00700-9>

10. Murray, C. B., Norris, D. J., & Bawendi, M. G. (1993). Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites. *Journal of the American Chemical Society*, 115(19), 8706–8715. <https://doi.org/10.1021/ja00072a025>

INTERNET MANBALAR:

1. Li, B., Chen, F., Xu, H., et al. (2024). Advances in understanding quantum dot light-emitting diodes. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1, 412–425. <https://doi.org/10.1038/s44287-024-00059-0> (murojaat qilingan sana: 12.10.2026).

2. Liu, M., et al. (2021). Colloidal quantum dot electronics. *Nature Electronics*. <https://www.nature.com/articles/s41928-021-00632-7> (murojaat qilingan sana: 12.10.2026).

Mittelstädt, A., Schliwa, A., & Klenovský, P. (2022). Modeling electronic and optical properties of III–V quantum dots. *Light: Science & Applications*. <https://www.nature.com/articles/s41377-021-00700-9> (murojaat qilingan sana: 12.10.2026).