ISSN:2308-5703
Impact factor:13.5 *International Multidisciplinary Online Journal* September, 2026

CSPBBR₃/OKSID GIBRID KOMPOZITLARIDA INTERFEYS JARAYONLARINING ZARYAD TASHUVCHILAR REKOMBINATSIYASI VA OPTIK XOSSALARGA TA'SIRI

Abbos Yusupov, Dilnavoz Kamalova, Feruz To'xtayev
Navoiy davlat universiteti, Navoiy, O'zbekiston
doi:https://doi.org/10.5281/zenodo.23037367

Annotatsiya. Maqolada $CsPbBr_3$ nanokristallarining SiO_2, ZnO va TiO_2 oksidlari bilan hosil qilgan gibrid kompozitlarida interfeys jarayonlarining optik xossalarga ta'siri qiyosiy tahlil qilindi. SiO_2 sirt passivatsiyasi orqali nurlanishsiz rekombinatsiyani kamaytirishi va optik barqarorlikni oshirishi, ZnO elektron ekstraksiyasini ta'minlashi, TiO_2 esa ichki elektr maydon orqali zaryadlarning yo'nalgan ajralishini boshqarishi ko'rsatildi. Natijalar oksid turiga bog'liq interfeys mexanizmlari $CsPbBr_3$ ning rekombinatsiya kinetikasi, zaryad transporti va fotoluminessensiya xususiyatlarini belgilashini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: $CsPbBr_3$, SiO_2, ZnO, TiO_2, geterointerfeys, rekombinatsiya, zaryad transferi, fotoluminessensiya.

I. Kirish.

Zamonaviy optoelektronik materiallarni ishlab chiqishda asosiy muammolardan biri fotoqo'zg'algan zaryad tashuvchilarning tez rekombinatsiyasi, sirt nuqsonlari ta'sirida yuzaga keladigan energiya yo'qotishlari hamda materiallarning tashqi muhitga nisbatan yetarlicha barqaror emasligidir. Ushbu muammolar yuqori optik samaradorlikka ega materiallardan yorug'lik chiqaruvchi qurilmalar, fotodetektorlar, fotoelektrik va fotokatalitik tizimlarda samarali foydalanishni cheklaydi. Ayniqsa, katta sirt/hajm nisbatiga ega nanokristallarda sirt va interfeys holatlari zaryad tashuvchilarning rekombinatsiya kinetikasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi [1–3]. To'liq noorganik $CsPbBr_3$ perovskit nanokristallari yuqori fotoluminessensiya kvant chiqishi, kuchli optik yutilish va tor emissiya spektri bilan ajralib turadi [1, 2]. Biroq ularning sirtida halogen vakansiyalari, koordinatsion to'yinmagan atomlar va boshqa nuqsonlarning mavjudligi elektron hamda kovaklarni tutib qoluvchi energetik holatlarni hosil qilishi mumkin. Natijada nurlanishsiz rekombinatsiya kuchayadi, fotoluminessensiya samaradorligi pasayadi va nanokristallarning namlik, kislorod, yorug'lik hamda harorat ta'siridagi degradatsiyasi tezlashadi [3]. Mazkur cheklovlarni kamaytirish usullaridan biri $CsPbBr_3$ ni SiO_2, ZnO va TiO_2 kabi oksid materiallari bilan gibridlash va perovskit–oksid interfeysini boshqarishdir [4–10]. Bunda oksidning fizik va elektron xususiyatiga qarab interfeysning funksiyasi sezilarli darajada farqlanadi. SiO_2 bilan gibridlashda sirt tuzoqlarining passivatsiyasi, nanokristallarning fazoviy izolyatsiyasi va tashqi muhitdan himoyalanishi nurlanishsiz rekombinatsiyani kamaytirishga xizmat qiladi [4–6]. Tajribalarda SiO_2 bilan passivatsiyalangan $CsPbBr_3$ nanokristallarida fotoluminessensiya intensivligi va PLQY ortishi hamda PL lifetime uzayishi kuzatilgan [5, 6]. Shu bilan birga, SiO_2 ning dielektrik tabiati zaryad tashuvchilar transporti va ekstraksiyasiga qo'shimcha qarshilik kiritishi mumkin [6]. ZnO va TiO_2 kabi yarimo'tkazgich oksidlar bilan hosil qilingan heterointerfeyslarda esa jarayon sirtni himoyalash bilan cheklanmaydi. $CsPbBr_3$/ZnO tizimida energetik zonalar moslashuvi fotoqo'zg'algan elektronlarning perovskitdan

ZnO tomon ekstraksiyasiga sharoit yaratishi mumkin [7, 10]. $CsPbBr_3/TiO_2$ heterostrukturalarida esa komponentlarning ish funksiyasi va Fermi darajalari farqi interfeysda zaryadlarning qayta taqsimlanishi, zona egilishi va ichki elektr maydon shakllanishiga olib keladi [8, 9]. Bunday interfeys S- yoki Z-sxemali zaryad transferi orqali elektron va kovaklarning fazoviy ajralishini boshqarishi mumkin [8, 9].

Shunday qilib, $CsPbBr_3$/oksid gibrid kompozitlarida kuzatiladigan fotoluminessensiya o‘zgarishlarini faqat oksidning mavjudligi bilan izohlash yetarli emas. Optik javob radiativ rekombinatsiya, sirt nuqsonlari bilan bog‘liq nurlanishsiz rekombinatsiya va interfeys orqali zaryad transferi kanallarining o‘zaro raqobati bilan belgilanadi. Shu sababli turli oksidlarning $CsPbBr_3$ dagi zaryad tashuvchilar dinamikasiga ta’sirini yagona qiyosiy yondashuv asosida o‘rganish muhim ilmiy masala hisoblanadi.

II. Tadqiqot usullari va metodlari.

Tadqiqotda $CsPbBr_3/SiO_2$, $CsPbBr_3/ZnO$ va $CsPbBr_3/TiO_2$ gibrid kompozitlarining optik xossalari hamda interfeys jarayonlari qiyosiy tahlil qilindi. Eksperimental natijalar tizimlashtirilib, oksid turining $CsPbBr_3$ nanokristallaridagi sirt holatlari, zaryad tashuvchilar dinamikasi va rekombinatsiya jarayonlariga ta’siri baholandi.

Optik xossalarni o‘rganishda UV–Vis yutilish spektroskopiyasi, fotoluminessensiya (PL), fotoluminessensiya kvant chiqishi (PLQY) va vaqt bo‘yicha ajratilgan fotoluminessensiya (TRPL) natijalaridan foydalanildi. PL spektrlari orqali emissiya maksimumi va spektr kengligi, PLQY orqali luminessensiya samaradorligi, TRPL orqali esa zaryad tashuvchilarning rekombinatsiya vaqti baholandi.

Kompozitlarning strukturaviy va sirt xususiyatlarini tavsiflashda rentgen difraksiyasi (XRD), transmissiyali va skanerlovchi elektron mikroskopiya (TEM va SEM), rentgen fotoelektron spektroskopiyasi (XPS) hamda Furye infraqizil spektroskopiyasi (FTIR) ma’lumotlari tahlil qilindi. Ushbu usullar kristall faza, zarrachalar morfologiyasi, interfeys tuzilishi va sirt kimyoviy holatidagi o‘zgarishlarni aniqlash imkonini berdi.

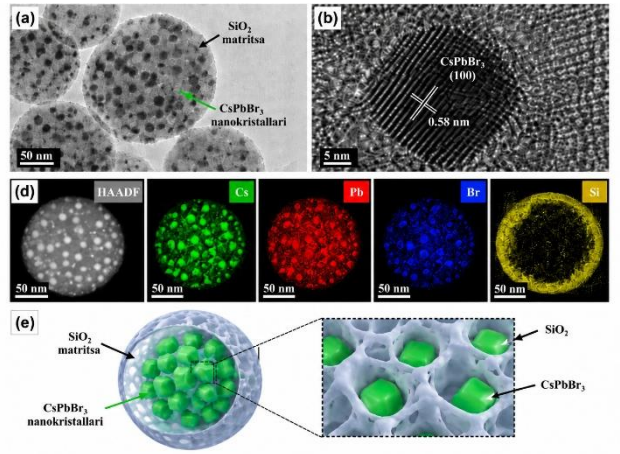
Natijalar radiativ rekombinatsiya (k_r), nurlanishsiz rekombinatsiya (k_{nr}) va interfeys orqali zaryad transferi (k_{CT}) jarayonlari asosida qiyoslandi. $CsPbBr_3/SiO_2$ tizimida sirt passivatsiyasi, $CsPbBr_3/ZnO$ da elektron ekstraksiyasi, $CsPbBr_3/TiO_2$ da esa ichki elektr maydon ta’siridagi zaryad ajralishi asosiy mexanizmlar sifatida qaraldi. Shu asosda oksid turining $CsPbBr_3$ ning optik xossalari va zaryad tashuvchilar dinamikasiga ta’siri umumlashtirildi.

III. Tadqiqot natijalari va ularning muhokamasi.

$CsPbBr_3$ nanokristallarini SiO_2, ZnO va TiO_2 bilan gibridlash natijasida yuzaga keladigan o‘zgarishlarning qiyosiy tahlili oksid turiga qarab interfeysning vazifasi sezilarli farq qilishini ko‘rsatadi. SiO_2 tizimida asosiy ta’sir sirt passivatsiyasi va himoyalash bilan bog‘liq bo‘lsa, ZnO va TiO_2 ishtirokida zaryad tashuvchilarning fazalararo ko‘chishi muhim ahamiyat kasb etadi.

$CsPbBr_3/SiO_2$ tizimida sirt passivatsiyasi va optik xossalar. $CsPbBr_3/SiO_2$ kompozitlari bo‘yicha natijalar SiO_2 ning perovskit nanokristallariga ikki yo‘nalishda ta’sir qilishini ko‘rsatadi. Birinchidan, SiO_2 qatlami $CsPbBr_3$ ni namlik, kislorod va boshqa tashqi omillar bilan bevosita kontaktdan himoya qiladi. Ikkinchidan, interfeys hosil bo‘lishi sirt nuqsonlari bilan bog‘liq nurlanishsiz rekombinatsiya kanallarining kamayishiga yordam beradi.

Mezog‘ovak SiO_2 tarkibida hosil qilingan $CsPbBr_3$ nanokristallarida fotoluminessensiya kvant chiqishi 89 ± 10 % gacha yetgan. Funksionallashtirilgan mezog‘ovak silika va qo‘shimcha SiO_2 qobig‘idan tashkil topgan tizimda esa ushbu ko‘rsatkich 90,0 % gacha oshgan. Bu natijalar SiO_2 faqat himoya qatlami emas, balki nanokristallarning sirt holatini boshqaruvchi komponent vazifasini ham bajarishini ko‘rsatadi.



1-rasm. $CsPbBr_3/SiO_2$ gibrid kompozitining morfologik tuzilishi va SiO_2 matritsasida $CsPbBr_3$ nanokristallarining joylashishi.

Rasmda TEM va HRTEM tasvirlari bilan birga $CsPbBr_3$ nanokristallarining SiO_2 matritsasida fazoviy chegaralanishi ko‘rsatilishi mumkin. Nanokristallarning kristall tuzilishi saqlanishini va ultrabinafsha nurlanish ostida $CsPbBr_3$ ga xos yashil fotoluminessensiya kuzatilishini ko‘rsatadi.

Sirt passivatsiyasining rekombinatsiya jarayoniga ta’siri fotoluminessensiyaning so‘nish vaqti orqali ham namoyon bo‘ladi. Silika bilan qoplangan $CsPbBr_3$ kompozitlarida o‘rtacha luminessensiya so‘nish vaqti 7,7 ns dan 33,1 ns gacha ortgani qayd etilgan. Boshqa $CsPbBr_3/SiO_2$ heterotuzilmalarida esa bu qiymat taxminan 40,5 ns, fotoluminessensiya kvant chiqishi esa 86 % ga yetgan. So‘nish vaqtining uzayishi va fotoluminessensiya kvant chiqishining yuqori qiymatlari sirt nuqsonlari bilan bog‘liq nurlanishsiz yo‘qotishlarning kamayishiga mos keladi.

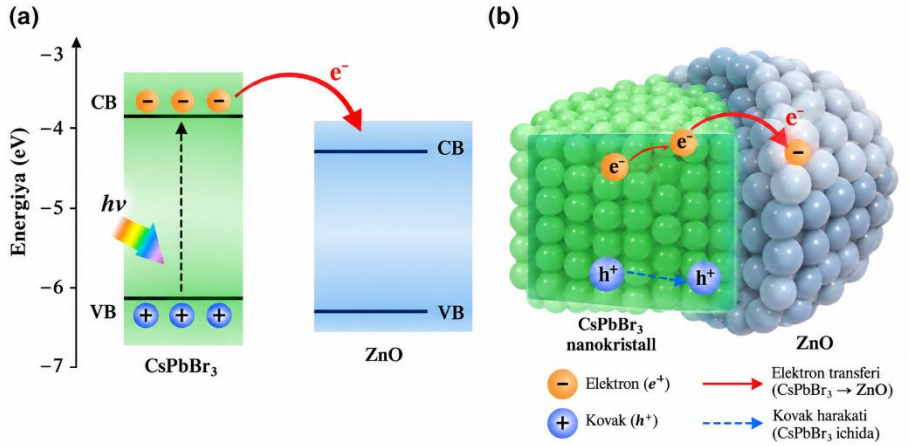
Biroq SiO_2 miqdorini cheksiz oshirish har doim ham foydali emas. SiO_2 dielektrik material bo‘lganligi sababli qobiq qalinlashishi zaryad tashuvchilarning interfeys orqali o‘tishini qiyinlashtirishi mumkin. Keltirilgan fotoelektrokimyoviy impedans natijalarida $CsPbBr_3/SiO_2$ tizimida zaryad uzatish qarshiligining ortishi qayd etilgan. Demak, yuqori fotoluminessensiya samaradorligi va samarali zaryad transporti o‘rtasida optimal nisbatni ta’minlash zarur.

$CsPbBr_3/ZnO$ tizimida elektronlarning ko‘chishi. $CsPbBr_3/ZnO$ geterostrukturasida SiO_2 dan farqli ravishda asosiy jarayon sirtni himoyalash emas, balki fotoqo‘zg‘algan zaryad tashuvchilarning interfeys orqali ko‘chishi bilan bog‘liq. Natijalarga ko‘ra, ZnO mavjudligida $CsPbBr_3$ dan elektronlarning energetik jihatdan qulay ZnO holatlariga o‘tishi mumkin. Natijada $CsPbBr_3$ ichida elektron va kovaklarning radiativ rekombinatsiyasi kamayib, fotoluminessensiya intensivligining pasayishi kuzatiladi.

Bu jarayon soddalashtirilgan holda quyidagicha ifodalanishi mumkin:

ISSN:2308-5703
Impact factor:13.5 *International Multidisciplinary Online Journal* September, 2026

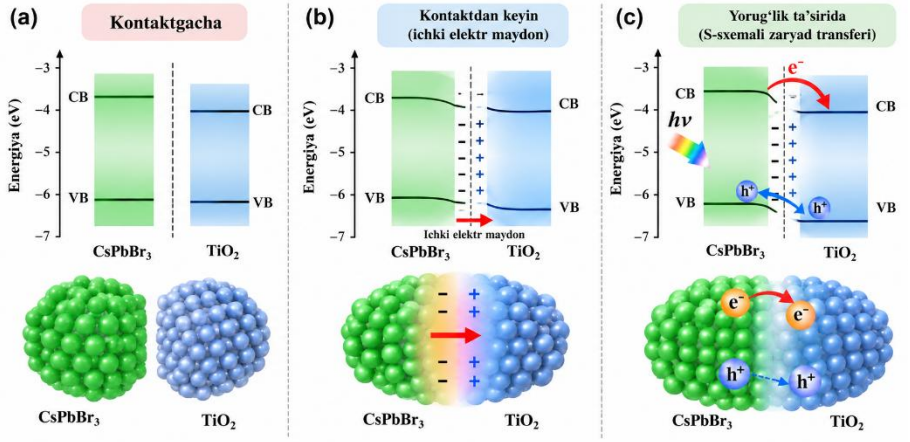
$CsPbBr_3 + h\nu \rightarrow e^- + h^+$;
$e^-(CsPbBr_3) \rightarrow e^-(ZnO)$



2-rasm. $CsPbBr_3$/ZnO geterointerfeysida fotoqo‘zg‘algan elektronlarning $CsPbBr_3$ dan ZnO tomon ko‘chish mexanizmi.

Bunda muhim jihat shundaki, fotoluminessensiya intensivligining kamayishini faqat elektron transferining isboti sifatida qabul qilish mumkin emas. ZnO qo‘shilishi natijasida yangi sirt nuqsonlari paydo bo‘lsa, nurlanishsiz rekombinatsiya ham kuchayishi mumkin. Shu sababli fotoluminessensiya natijalarini vaqt bo‘yicha ajratilgan fotoluminessensiya, sirt kimyosi va interfeys morfologiyasi bilan birgalikda baholash talab etiladi.

$CsPbBr_3/TiO_2$ tizimida ichki elektr maydonning ta’siri. $CsPbBr_3/TiO_2$ geterostrukturasida zaryad tashuvchilar dinamikasi yanada murakkab xarakterga ega. $CsPbBr_3$ va TiO_2 o‘zaro kontaktga kelganda ularning elektron xossalaridagi farq tufayli interfeysda zaryadlarning qayta taqsimlanishi sodir bo‘ladi. Natijada zona egilishi va ichki elektr maydon shakllanadi. Tezisda keltirilgan natijalarga ko‘ra, ushbu elektr maydonning yo‘nalishi $CsPbBr_3$ dan TiO_2 tomon bo‘lib, yorug‘lik ta’sirida zaryadlarning ajralishi va ko‘chishiga ta’sir qiladi.



3-rasm. $TiO_2/CsPbBr_3$ geterointerfeysida zaryadlarning qayta taqsimlanishi va yorug‘lik ta’siridagi S-sxemali zaryad transferi.

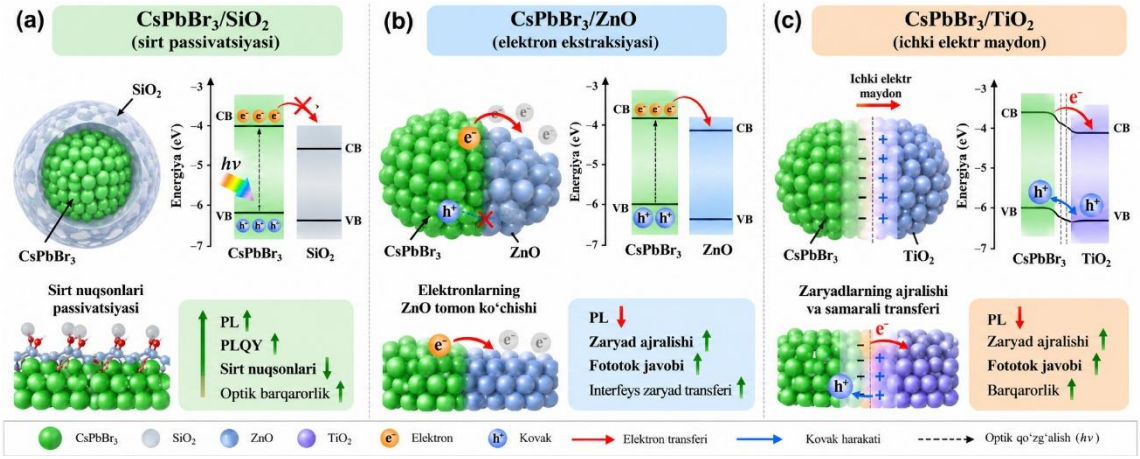
Rasmda $CsPbBr_3$ va TiO_2 kontaktidan oldingi holat, kontakt natijasida hosil bo‘ladigan ichki elektr maydon hamda yorug‘lik ta’siridagi zaryad transferi bosqichma-bosqich tasvirlangan. Bunday

ISSN:2308-5703
Impact factor:13.5 *International Multidisciplinary Online Journal* September, 2026

mexanizm zaryad tashuvchilarning fazoviy ajralishini ta’minlab, ularning qayta birikish ehtimolini boshqaradi.

Mezog‘ovak TiO_2 tarkibida $CsPbBr_3$ hosil qilingan tizimlarda TiO_2 bir vaqtning o‘zida geterointerfeys va himoyalovchi matritsa vazifasini ham bajarishi mumkin. Tezisda keltirilgan 2024-yilgi tadqiqot natijalarida bunday tizimning suv, havo va yuqori harorat ta’siridagi luminessensiya barqarorligi bilan birga fototok javobi ham yaxshilangani qayd etilgan. Bu holat $CsPbBr_3/TiO_2$ tizimida optik barqarorlik va zaryad ajralishini bir vaqtning o‘zida boshqarish imkoniyatini ko‘rsatadi.

Oksidlarning ta’sirini qiyosiy baholash. Olingan natijalarni umumlashtirish SiO_2, ZnO va TiO_2 ning $CsPbBr_3$ ga ta’siri bir-biridan prinsipial jihatdan farq qilishini ko‘rsatadi. SiO_2 asosan sirt nuqsonlarini passivatsiyalash va nanokristallarni tashqi muhitdan himoyalash orqali nurlanishsiz rekombinatsiyani kamaytiradi. ZnO bilan gibridlashda $CsPbBr_3$ dan elektronlarning ekstraksiyasi ustun jarayon sifatida namoyon bo‘ladi. TiO_2 bilan hosil qilingan geterointerfeysda esa zaryadlarning qayta taqsimlanishi va ichki elektr maydon zaryad ajralishini boshqaruvchi asosiy omil hisoblanadi.



4-rasm. $CsPbBr_3/SiO_2$, $CsPbBr_3/ZnO$ va $CsPbBr_3/TiO_2$ gibrid kompozitlarida dominant interfeys jarayonlarining qiyosiy sxemasi.

Mazkur tadqiqot bo’yicha natijalarni uch qismdan tashkil etish maqsadga muvofiq: (a) $CsPbBr_3/SiO_2$ — sirt nuqsonlarining passivatsiyasi va nurlanishsiz rekombinatsiyaning kamayishi; (b) $CsPbBr_3/ZnO$ — elektronlarning ZnO tomon ekstraksiyasi; (c) $CsPbBr_3/TiO_2$ — ichki elektr maydon va S-sxemali zaryad ajralishi.

Xulosa. Shunday qilib, uchala gibrid tizim uchun yagona qonuniyat sifatida “oksid xususiyati → interfeys holati → rekombinatsiya yoki zaryad transferi → optik javob” bog‘lanishini ajratish mumkin. SiO_2 holatida fotoluminessensiyaning kuchayishi sirt passivatsiyasi bilan bog‘liq bo‘lsa, ZnO va TiO_2 tizimlarida fotoluminessensiyaning so‘nishi samarali zaryad ajralishining belgisi bo‘lishi mumkin. Biroq fotoluminessensiya intensivligining o‘zi bu mexanizmlarni bir-biridan ajratish uchun yetarli emas. Shu sababli fotoluminessensiya kvant chiqishi, vaqt bo‘yicha ajratilgan fotoluminessensiya, sirt holati va morfologik tahlil natijalarini kompleks baholash $CsPbBr_3$/oksid gibrid kompozitlaridagi interfeys jarayonlarini to‘g‘ri talqin qilishning muhim sharti hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M. I. et al. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites ($CsPbX_3$, X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut. Nano Letters, 2015, 15, 3692–3696. DOI: 10.1021/nl5048779.
2. Swarnkar A., Marshall A. R., Sanehira E. M. et al. Colloidal $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals: Luminescence beyond Traditional Quantum Dots. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55, 2382–2386. DOI: 10.1002/anie.201508276.
3. Shamsi J., Urban A. S., Imran M., De Trizio L., Manna L. Metal Halide Perovskite Nanocrystals: Synthesis, Post-Synthesis Modifications, and Their Optical Properties. Chemical Reviews, 2019, 119, 3296–3348. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00644.
4. Zhong Q., Cao M., Hu H. et al. One-Pot Synthesis of Highly Stable $CsPbBr_3$@SiO_2 Core–Shell Nanoparticles. ACS Nano, 2018, 12, 8579–8587. DOI: 10.1021/acsnano.8b04209.
5. Cao Y., Shao Y., Zhang J., Chen C., Wang Q. The Photothermal Stability Study of Silica-Coated $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals. Journal of Solid State Chemistry, 2022, 311, 123086. DOI: 10.1016/j.jssc.2022.123086.
6. Shen X. et al. Enhanced Photoelectric Properties of $CsPbBr_3$ by SiO_2 and TiO_2 Bilayer Heterostructures. Langmuir, 2024, 40, 2719–2728. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c03334.
7. Nagal V., Kumar V., Rahman S. et al. Insight into Hot Carrier Kinetics of $CsPbBr_3$/ZnO Heterostructures for Photodetector Application. ACS Applied Optical Materials, 2023, 1, 779–787. DOI: 10.1021/acsaom.2c00201.
8. Xu F., Meng K., Cheng B. et al. Unique S-Scheme Heterojunctions in Self-Assembled TiO_2/$CsPbBr_3$ Hybrids for CO_2 Photoreduction. Nature Communications, 2020, 11, 4613. DOI: 10.1038/s41467-020-18350-7.
9. Dong Z., Zhang Z., Jiang Y., Chu Y., Xu J. Embedding $CsPbBr_3$ Perovskite Quantum Dots into Mesoporous TiO_2 Beads as an S-Scheme Heterojunction for CO_2 Photoreduction. Chemical Engineering Journal, 2022, 433, 133762. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133762.
10. Jiang C., Wang J., Wang Y., Du L. Mechanisms of Band Alignment and Charge Transfer in Interfacial Termination-Dependent Heterojunctions between $CsPbBr_3$ and TiO_2, SnO_2, and ZnO Electron-Transport Layers. Computational Materials Science, 2026, 273, 114973. DOI: 10.1016/j.commatsci.2026.114973.