

KRISTALL PANJARALARDA NODIR YER IONLARINING OPTIK VA MAGNIT XOSSALARINI O'RGANISH

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ИОНОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЁТКАХ

STUDY OF OPTICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF RARE-EARTH IONS IN CRYSTAL LATTICES

Narzulloyev Ulug'bek Amrillo o'g'li

Buxoro davlat pedagogika instituti Fizika va texnologik ta'lim kafedrası o'qituvchisi

E-mail: ulugbeknarzulloyev444@gmail.com.

Annotatsiya. Mazkur maqolada kristall panjaraga kiritilgan nodir yer ionlarining optik va magnit xossalarining shakllanish mexanizmlari tizimli ravishda tahlil qilinadi. Asosiy e'tibor lantanoid ionlarining 4f-elektron konfiguratsiyasi, kristall maydon ta'siri, spin-orbit o'zaro ta'siri hamda ion-panjara va ion-ion o'zaro ta'sirlarining spektral va magnit parametrlarni belgilashdagi rolga qaratiladi. Optik xossalarni baholashda yutilish, fotoluminessensiya, Stoks siljishi, energiya sathlari va Judd-Ofelt yondashuvi; magnit xossalarni o'rganishda esa magnit sezuvchanlik, elektron paramagnit rezonans (EPR), g-faktor, kristall maydon sathlari va magnit anizotropiya kabi parametrlar ko'rib chiqiladi. Tahlil shuni ko'rsatadiki, mezbон kristallning simmetriyasi, ionning valent holati va koordinatsion muhiti optik o'tishlar intensivligi hamda magnit javobni sezilarli darajada o'zgartiradi. Natijalar nodir yer ionlari asosidagi lazer materiallari, lyuminoforlar, optik kuchaytirgichlar, magneto-optik qurilmalar va kvant axborot texnologiyalari uchun materiallarni maqsadli tanlashda nazariy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Аннотация. В статье систематически анализируются механизмы формирования оптических и магнитных свойств ионов редкоземельных элементов, введенных в кристаллические решётки. Рассматривается роль 4f-электронной конфигурации, кристаллического поля, спин-орбитального взаимодействия, а также взаимодействий ион-решётка и ион-ион. Для анализа оптических свойств рассматриваются спектры поглощения и фотолюминесценции, энергетическая структура уровней и подход Джадда-Офелта; для магнитных свойств — магнитная восприимчивость, электронный парамагнитный резонанс, g-фактор, расщепление уровней кристаллическим полем и магнитная анизотропия. Показано, что симметрия кристалла и локальное координационное окружение существенно влияют на интенсивность оптических переходов и магнитный отклик. Полученные выводы могут быть использованы при целенаправленном выборе материалов для лазеров, люминофоров,

оптических усилителей, магнитооптических устройств и квантовых технологий.

Abstract. This paper presents a systematic analysis of the mechanisms governing the optical and magnetic properties of rare-earth ions incorporated into crystal lattices. Particular attention is paid to the 4f electronic configuration, crystal-field effects, spin–orbit coupling, and ion–lattice and ion–ion interactions. Optical properties are discussed using absorption and photoluminescence spectra, energy-level schemes, and the Judd–Ofelt approach, while magnetic properties are considered through magnetic susceptibility, electron paramagnetic resonance, g-factors, crystal-field splitting, and magnetic anisotropy. The analysis shows that host-crystal symmetry, local coordination, oxidation state, and dopant concentration can strongly modify transition intensities, emission efficiency, relaxation pathways, and magnetic response. These relationships provide a basis for the rational selection and design of rare-earth-doped materials for solid-state lasers, phosphors, optical amplifiers, magneto-optical devices, sensors, and quantum technologies.

Kalit soʻzlar: nodir yer ionlari, kristall panjara, 4f-elektronlar, kristall maydon, optik yutilish, fotolyuminessensiya, Judd–Ofelt nazariyasi, magnit sezuvchanlik, EPR, magnit anizotropiya, magneto-optik effektlar.

Ключевые слова: редкоземельные ионы, кристаллическая решётка, 4f-электроны, кристаллическое поле, оптическое поглощение, фотолуминесценция, теория Джадда–Офелта, магнитная восприимчивость, ЭПР, магнитная анизотропия, магнитооптические эффекты.

Keywords: rare-earth ions, crystal lattice, 4f electrons, crystal field, optical absorption, photoluminescence, Judd–Ofelt theory, magnetic susceptibility, EPR, magnetic anisotropy, magneto-optical effects.

Kirish.

Nodir yer elementlari, ayniqsa lantanoidlar, kristall materiallarning optik, magnit va magneto-optik xossalarni boshqarish uchun muhim aktiv markazlar hisoblanadi. Ularning oʻziga xos xususiyatlari asosan qisman toʻlgan 4f qobigʻining elektron tuzilishi bilan bogʻliq. 4f elektronlari tashqi 5s va 5p elektronlari tomonidan qisman ekranlanganligi sababli mezbon kristallning taʼsiri koʻplab boshqa oʻtish metall ionlariga nisbatan boshqacha namoyon boʻladi. Shu bilan birga, kristall maydon, spin-orbit oʻzaro taʼsiri va mahalliy simmetriya energiya sathlarining nozik boʻlinishiga olib keladi [1, 2].

Nodir yer ionlarining optik spektrlari koʻpincha tor chiziqli 4f–4f oʻtishlari, uzoq yashovchi qoʻzgʻalgan holatlar va mezbon panjaraga bogʻliq energiya uzatish jarayonlari bilan tavsiflanadi. Shu sababli ular lazerlar, optik kuchaytirgichlar, lyuminoforlar, scintillyatorlar va kvant axborot tizimlarida qoʻllash uchun istiqbolli hisoblanadi [1, 3].

Magnit nuqtai nazardan esa lantanoid ionlarining orbital va spin momentlari, spin-orbit bog'lanish hamda kristall maydon bilan o'zaro ta'siri magnit anizotropiya va temperaturaga bog'liq magnit javobni belgilaydi. Ayrim kristall tizimlarda nodir yer ionlari kuchli magneto-optik effektlar, shu jumladan Faradey aylanishi uchun faol markaz vazifasini bajarishi mumkin [4].

Mazkur ishning maqsadi — kristall panjaralarga kiritilgan nodir yer ionlarining optik va magnit xossalarini belgilovchi asosiy fizik mexanizmlarni yagona metodik yondashuvda tahlil qilish, ularni tajribaviy aniqlash usullarini tavsiflash hamda materialning tuzilishi bilan kuzatiladigan fizik xossalar o'rtasidagi bog'lanishlarni umumlashtirish.

Adabiyotlar tahlili.

Nodir yer ionlarining optik xossalarini tavsiflashda 4f elektron holatlarining energiya tuzilishi markaziy o'rin tutadi. Judd-Ofelt nazariyasi $4f \rightarrow 4f$ o'tishlarining intensivliklarini baholash, o'tish kuchlari, radiatsion ehtimollar va ayrim lyuminesensiya parametrlarini hisoblashda keng qo'llanadi [2]. Ushbu nazariya amaliy jihatdan samarali bo'lsa-da, uning parametrlarini talqin qilishda kristall simmetriyasi, J-aralashish va boshqa yuqori tartibli ta'sirlarni hisobga olish zarur.

Zamonaviy sharhlarda nodir yer bilan legirlangan kristall va nanomateriallarning optik xossalari dopant ionining elektron tuzilishigina emas, balki mezbon panjaraning simmetriyasi, fazaviy holati, koordinatsion muhiti va ionlararo masofalari bilan ham belgilanishi ko'rsatiladi [1, 5]. 2026-yilgi tadqiqotlarda ham kristall sayt simmetriyasi, ionning panjaradagi joylashuvi va luminessensiya spektri o'rtasidagi bog'lanish alohida ta'kidlangan [6].

Magnit xossalarni o'rganishda EPR usuli ayniqsa paramagnit nodir yer ionlarining mahalliy elektron holati, sayt simmetriyasi va ionlararo o'zaro ta'sirlarini aniqlash imkonini beradi. EPR spektrlarining burchak bo'yicha o'zgarishi kristall maydonning anizotropiyasini baholash uchun muhim ma'lumot beradi [7].

Shunday qilib, mavjud tadqiqotlar optik va magnit o'lchovlarni birgalikda olib borish nodir yer ionining kristall ichidagi haqiqiy lokal holatini to'liqroq tushuntirishga imkon berishini ko'rsatadi. Bu yondashuv materiallarni faqat spektral yoki faqat magnit parametr bo'yicha emas, balki kompleks funksional xususiyatlar bo'yicha tanlashga zamin yaratadi.

Metodlar.

Tadqiqot konseptual-nazariy va tahliliy yondashuvga asoslanadi. Tadqiqot obyekti sifatida nodir yer ionlari bilan legirlangan dielektrik yoki yarimo'tkazgich kristall panjaralar qaraladi. Asosiy parametrlar: ionning valent holati, 4f elektronlar soni, mezbon kristall simmetriyasi, dopant konsentratsiyasi, temperatura va tashqi magnit maydon kuchlanganligi.

Optik xossalarni o'rganish uchun yutilish va fotoluminessensiya spektroskopiyasi asosiy usullar sifatida tanlanadi. Yutilish spektridagi chiziqlar energiya sathlari orasidagi o'tishlarni aniqlashga, fotoluminessensiya esa qo'zg'algan holatlarning relaksatsiyasi va emissiya kanallarini tahlil qilishga imkon beradi. Emissiya samaradorligi uchun kvant chiqishi, yashash vaqti va Stoks siljishi kabi parametrlar hisobga olinadi.

Judd–Ofelt yondashuvida eksperimental spektral ma'lumotlardan foydalanib intensivlik parametrlarini baholash mumkin. Soddashtirilgan holda radiatsion o'tish tezligi A_{if} va radiatsion yashash vaqti τ_{rad} o'rtasida $\tau_{rad} = 1/\Sigma A_{if}$ munosabatidan foydalaniladi [2]. Eksperimental yashash vaqti bilan taqqoslash orqali no-radiatsion so'nish mexanizmlarini baholash mumkin.

Magnit xossalarni o'rganishda magnit sezuvchanlik $\chi(T)$, EPR spektrlari va tashqi magnit maydonning yo'nalishiga bog'liq magnit javob tahlil qilinadi. Paramagnit sohada birinchi yaqinlashuvda Kyuri qonuni $\chi = C/T$ yoki Kyuri–Veys modeli $\chi = C/(T-\theta)$ ishlatilishi mumkin. Bu yerda C — Kyuri doimiysi, θ — o'zaro almashinuv yoki korrelyatsiyalarni tavsiflovchi parametr. EPR orqali g-faktor va kristall maydonning lokal anizotropiyasi haqida ma'lumot olinadi [7].

Tuzilish–xossa bog'lanishini aniqlash uchun XRD orqali kristall faza va panjara parametrlarini, zarur hollarda Raman/IR spektroskopiyasi orqali panjara tebranishlarini, optik spektroskopiya orqali elektron o'tishlarni va magnit o'lchovlar orqali makroskopik javobni o'zaro taqqoslash tavsiya etiladi.

Natijalar.

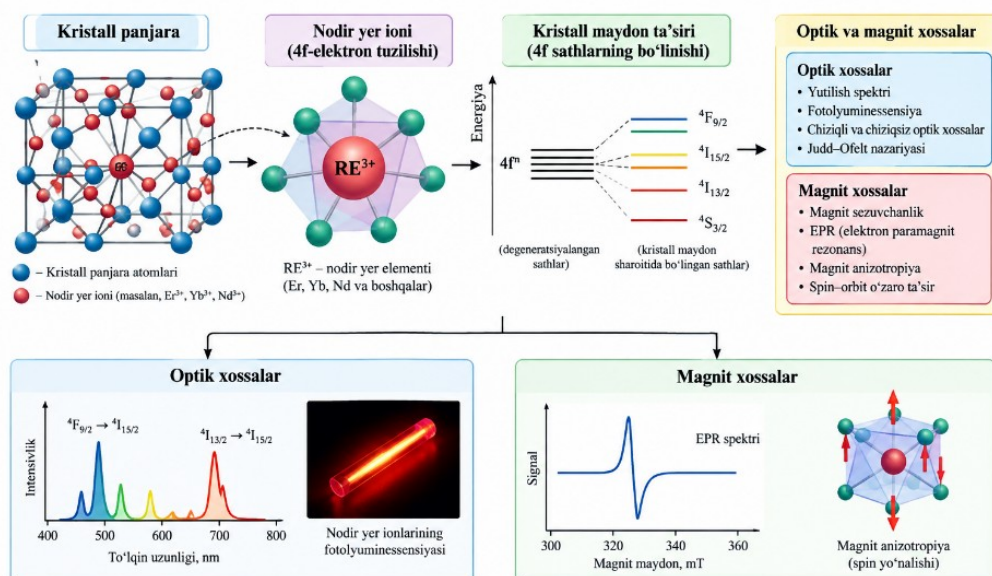
Nazariy va adabiyotlar tahlili asosida nodir yer ionlarining optik va magnit xossalariga ta'sir qiluvchi asosiy omillar quyidagicha umumlashtirildi: (1) 4f elektron konfiguratsiyasi; (2) kristall maydon simmetriyasi va kuchi; (3) spin-orbit o'zaro ta'siri; (4) dopant konsentratsiyasi; (5) temperatura; (6) ionlarning o'zaro masofasi va energiya migratsiyasi; (7) mezbon panjaraning fonon spektri.

Optik tomondan 4f–4f o'tishlarining nisbatan tor spektral chiziqlari nodir yer ionlarini selektiv spektral markaz sifatida ajratib turadi. Mezbon panjara simmetriyasi va lokal koordinatsiya muhitining o'zgarishi spektral chiziqlarning bo'linishi, intensivligi va qutblanish xususiyatlariga ta'sir qiladi [1, 6]. Konsentratsiya ortishi esa ionlararo energiya uzatilishi va konsentratsion so'nish ehtimolini oshirishi mumkin.

Magnit xossalarda 4f elektronlarining orbital va spin hissalarini muhim rol o'ynaydi. Kristall maydon degeneratsiyani qisman yoki to'liq yechishi natijasida samarali magnit momentning temperatura va magnit maydon yo'nalishiga bog'liqligi yuzaga keladi. Kramers ionlarida EPR spektri orqali asosiy holatning bo'linishi va lokal simmetriya haqida batafsil ma'lumot olish mumkin [7].

Quyidagi jadval tadqiqotning asosiy o'lchanadigan parametrlarini tizimlashtiradi.

1-jadval. Nodir yer ionlari bilan legirlangan kristalllarda optik, magnit va strukturaviy parametrlarni aniqlash usullari.



1-rasm. Nodir yer ionlarining kristall panjarada joylashishi va ularning optik hamda magnit xossalari shakllanish mexanizmi.

Kristall panjara → lokal koordinatsion muhit → kristall maydon + spin-orbit o'zaro ta'siri → 4f sathlarining bo'linishi → optik o'tishlar va magnit javob Munozara.

Olingan umumlashtirilgan natijalar nodir yer ionining xossalari faqat ionning o'ziga xos elektron konfiguratsiyasi bilan izohlash yetarli emasligini ko'rsatadi. Bir xil ion turli mezbon kristalllarda turlicha spektral va magnit parametrlarni namoyon qilishi mumkin. Buning asosiy sababi lokal kristall maydon va ionning koordinatsion muhitidir [1, 5, 6].

Optik jihatdan, kristall maydon 4f sathlarining Stark komponentlariga ajralishiga sabab bo'ladi. Shu bois past temperaturada olingan yuqori aniqlikdagi spektrlar ionning lokal simmetriyasi va mezbon panjara bilan o'zaro ta'siri haqida muhim ma'lumot beradi. Ayrim hollarda bir nechta kristallografik saytlar mavjudligi spektrda qo'shimcha chiziqlar paydo bo'lishiga olib kelishi mumkin [7].

Magnit xossalarda esa spin-orbit bog'lanish va kristall maydonning raqobati muhim. Ayniqsa, kuchli anizotropiyaga ega nodir yer tizimlarida magnit momentning tashqi maydon yo'nalishiga bog'liqligi sezilarli bo'lishi mumkin. Bu holat magneto-optik qurilmalar, sensorlar va spintronik elementlar uchun foydali funksional xususiyatga aylanishi mumkin [4].

Materialni amaliy qo'llash nuqtai nazaridan optimal dopant konsentratsiyasi muhim parametr hisoblanadi. Konsentratsiya juda past bo'lsa, emissiya intensivligi yetarli bo'lmasligi mumkin; juda yuqori konsentratsiyada esa ion-ion energiya migratsiyasi va konsentratsion so'nish kuchayishi ehtimoli ortadi. Shuning uchun materialni loyihalashda optik intensivlik, yashash vaqti, kvant samaradorligi va magnit parametrlarni birgalikda optimallashtirish maqsadga muvofiq.

Mazkur maqola eksperimental natijalarni emas, mavjud ilmiy yondashuvlar asosidagi tahliliy umumlashtirishni beradi. Shuning uchun jadvaldagi parametrlar uchun aniq sonli qiymatlar keltirilmagan; real namunalar bo'yicha bunday qiymatlar spektroskopik, EPR va magnit o'lchovlar natijasida aniqlanishi kerak.

Xulosa.

Kristall panjaralardagi nodir yer ionlarining optik va magnit xossalari 4f elektron konfiguratsiyasi, kristall maydon, spin-orbit o'zaro ta'siri, lokal simmetriya, temperatura va dopant konsentratsiyasining birgalikdagi ta'siri bilan belgilanadi. Optik xossalarni yutilish va fotoluminessensiya spektroskopiyasi, magnit xossalarni esa magnit sezuvchanlik, $M(H)$ bog'lanishi va EPR orqali kompleks o'rganish eng informativ yondashuvlardan biridir.

Judd–Ofelt tahlili optik o'tishlarning intensivlik va radiatsion parametrlarini baholashda, EPR esa lokal elektron holat va kristall maydon anizotropiyasini aniqlashda muhim vosita bo'lib xizmat qiladi. Optik va magnit ma'lumotlarni XRD hamda vibratsion spektroskopiya natijalari bilan birlashtirish kristall tuzilishi bilan funksional xossalar o'rtasidagi sababiy bog'lanishni aniqroq ochib beradi.

Kelgusidagi tadqiqotlarda konkret mezbon kristall (masalan, granat, oksid, fluorid yoki boshqa dielektrik), konkret nodir yer ioni (Eu^{3+} , Er^{3+} , Nd^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} va boshqalar) va dopant konsentratsiyasini tanlab, temperaturaga hamda magnit maydon yo'nalishiga bog'liq optik va magnit o'lchovlarni parallel olib borish maqsadga muvofiq. Bunday kompleks yondashuv yangi avlod optoelektron, magneto-optik va kvant texnologiyalari uchun funksional materiallarni tanlash imkonini kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Toncelli A., Antić Ž. (eds.). Optical and Spectroscopic Properties of Rare-Earth-Doped Crystals. MDPI, 2023. DOI: 10.3390/books978-3-0365-7383-0.
2. Digonnet M.J.F. (ed.). Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Marcel Dekker, 2001. (Judd–Ofelt va nodir yer ionlarining optik o'tishlari bo'yicha umumiy nazariy asoslar).
3. Thiel C.W., Sinclair N., Böttger T., et al. Rare-earth-doped crystals for quantum information processing. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Vol. 46, 2015, pp. 1–78. DOI: 10.1016/B978-0-444-63260-9.00267-4.
4. Nature Index. Magneto-Optical Properties of Rare-Earth Ceramics and Crystals. Magneto-optik hodisalarning nodir yer ionlari bilan bog'liq fizik asoslari va qo'llanilishi.
5. Juan W., Wang F., Deng R., et al. Rare-Earth Doping in Nanostructured Inorganic Materials. Chemical Reviews, 2022, 122(6), 5519–5603. DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00644.

6. Multiple symmetry, site-selective spectrum and luminescence origin for rare earth ions doped materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2026, 1065, 188094. DOI: 10.1016/j.jallcom.2026.188094.
7. Understanding the luminescence of rare-earth-doped crystals through electron paramagnetic resonance spectroscopy. *Journal of Luminescence*, 2007, Vols. 122–123, pp. 896–898.
8. Malta O.L. et al. 50th anniversary of the Judd–Ofelt theory: An experimentalist's view of the formalism and its application. *Journal of Luminescence*, 2013, 136, 221–239. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.10.035.