UO‘K 53:538.9

CoSi VA $CoSi_2$ YUPQA PLYONKALARINING OPTIK YUTILISH SPEKTRLARI

Sharipov Mirzo Zokirovich,
Buxoro davlat universiteti Fizika-matematika va axborot texnologiyalari fakulteti Fizika kafedrasi professori
m.z.sharipov@rambler.ru
Ibrohimova Sabohat Shoyimovna,
Buxoro davlat universiteti Fizika-matematika va axborot texnologiyalari fakulteti Fizika kafedrasi izlanuvchisi
ibrohimovasabohat6@gmail.com

Annotatsiya. *Ushbu maqolada shisha substratlar ustiga DC-magnetron changlatish usulida cho‘ktirilgan CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalarining xona haroratidagi optik yutilish spektrlari 190–1100 nm to‘lqin uzunligi diapazonida tadqiq qilingan. Har ikkala spektrda kobalt–kremniy bog‘lanishi va metall xarakteridagi elektron tuzilmaga xos keng yutilish polosalari kuzatilgan, biroq xarakterli maksimumlarning holati va intensivligida sezilarli farqlar aniqlangan. Eksperimental spektrlardan ajratib olingan M1-M4 spektral xususiyatlarning fotonlar energiyasi hisoblab chiqilgan va ularning kristall tuzilma bilan bog‘liqligi muhokama qilingan. Olingan natijalar CoSi va $CoSi_2$ fazalarining o‘xshash kimyoviy tarkibiga qaramay, ularning optik xossalari fazaga bog‘liq ravishda sezilarli darajada farqlanishini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar: *kobalt monosilitsidi, kobalt disilitsidi, yupqa plyonka, optik yutilish spektri, magnetron changlatish, elektron tuzilma, o‘tish metall silitsidlari.*

СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК CoSi И $CoSi_2$

Аннотация. *В данной статье исследованы спектры оптического поглощения при комнатной температуре тонких плёнок CoSi и CoSi2, полученных методом DC-магнетронного распыления на стеклянных подложках, в диапазоне длин волн 190–1100 нм. В обоих спектрах наблюдаются широкие полосы поглощения, характерные для связи Co–Si и электронной структуры металлического типа, однако положение и интенсивность характерных максимумов существенно различаются. Рассчитаны энергии фотонов, соответствующие спектральным особенностям M1–M4, выделенным из экспериментальных спектров, и обсуждена их связь с кристаллической структурой. Полученные результаты показывают, что, несмотря на сходный химический состав фаз CoSi и CoSi2, их оптические свойства существенно различаются в зависимости от фазы.*

Ключевые слова: *моносилицид кобальта, дисилицид кобальта, тонкая плёнка, спектр оптического поглощения, магнетронное распыление, электронная структура, силициды переходных металлов.*

OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF CoSi AND CoSi2 THIN FILMS

Abstract. *This paper investigates the room-temperature optical absorption spectra of CoSi and CoSi2 thin films deposited by DC magnetron sputtering onto glass substrates, in the 190–1100 nm wavelength range. Both spectra exhibit broad absorption bands characteristic of the Co–Si bond and the metallic-type electronic structure, while the positions and intensities of the characteristic maxima differ significantly. The photon energies corresponding to the M1–M4 spectral features extracted from the experimental spectra were calculated, and their relationship to the crystal structure is discussed. The obtained results show that, despite the similar chemical composition of the CoSi and CoSi2 phases, their optical properties differ substantially depending on the phase.*

Keywords: *cobalt monosilicide, cobalt disilicide, thin film, optical absorption spectrum, magnetron sputtering, electronic structure, transition metal silicides.*

Kirish. O‘tish metallari silitsidlari, xususan kobalt silitsidlari (CoSi va $CoSi_2$), yarimo‘tkazgichlar texnologiyasi va zamonaviy elektron qurilmalarni yaratishda muhim o‘rin egallaydi [1–3]. Kremniyga yaqin panjara parametri, yuqori termik barqarorlik va past elektr qarshiligi tufayli $CoSi_2$ uzoq vaqtdan beri ultra

katta integral sxemalarda (ULSI) kontakt va metallashtirish materiali sifatida qo‘llanilib kelinmoqda [2, 4]. $CoSi_2$ flyuorit (CaF_2) tipidagi kub panjaraga ega bo‘lib, uning kremniy bilan panjara mos kelmasligi taxminan 1,2% ni tashkil etadi, bu esa uning kremniy asosidagi qurilmalarda epitaksial o‘sishini osonlashtiradi; ikkala silitsid fazasining kristallografik va termodinamik parametrlari adabiyotlarda batafsil tizimlashtirilgan [6–9].

So‘nggi yillarda kobalt monosilitsidi (CoSi) fizikaviy xossalari yangi qirralari bilan qayta kashf etilmoqda. CoSi B_20 tipidagi markazsiz simmetriyaga ega kub panjarada kristallanadi va katta topologik zaryadga ega kiral fermionlarni, jumladan, Brillyuen zonasining Γ va R nuqtalarida joylashgan tugunlarni bog‘lovchi Fermi yoylarini o‘zida namoyon etuvchi topologik xiral yarimmetall sifatida burchak-bog‘langan fotoemissiya spektroskopiyasi (ARPES) usulida tasdiqlangan [10–12]. Bunday noan’anaviy elektron tuzilma CoSi ning optik javobini $CoSi_2$ nikidan tubdan farqli qiladi: ko‘p karrali (multifold) fermionlar hisobiga yuzaga keladigan o‘ziga xos optik signaturalar nazariy va eksperimental tadqiqotlarda alohida aniqlangan [16, 17].

CoSi va $CoSi_2$ ning optik xossalari ilgari ham bir qator ishlarda o‘rganilgan. Xususan, Kudryavtsev va boshqalar kobalt silitsidlarining optik xossalarini eksperiment va zichlik funksionali nazariyasi (DFT) uyg‘unligida tahlil qilgan [13], Vu va boshqalar epitaksial $CoSi_2$ plyonkalarining optik xossalarini 0,062-22,3 eV kabi keng energiya diapazonida o‘rgangan [14], van der Marel va boshqalar esa o‘tish metallari monosilitsidlaridagi spin, zaryad va bog‘lanish xususiyatlarini optik spektroskopiya asosida tahlil qilgan [15]. Shunga qaramay, CoSi va $CoSi_2$ fazalarining optik yutilish spektrlarini bir xil texnologik sharoitda tayyorlangan namunalarda to‘g‘ridan-to‘g‘ri taqqoslash borasidagi ma’lumotlar hozircha yetarli emas. Optik yutilish va Raman spektroskopiyasi usullarining shunga o‘xshash uslubiy yondashuvlari muallif tomonidan boshqa funksional kristall materiallar - Dy3Fe5O12 [18] va HoFe3(BO3)4 ferroborati [19] - misolida ham muvaffaqiyatli qo‘llanilgan.

Ushbu ishning maqsadi DC-magnetron changlatish usulida shisha substratlarga bir xil texnologik sharoitda cho‘ktirilgan CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalarining xona haroratidagi optik yutilish spektrlarini 190-1100 nm oralig‘ida eksperimental tadqiq qilish, ularning xarakterli spektral xususiyatlarini aniqlash va bu xususiyatlarni ikkala fazaning elektron tuzilmasidagi farqlar bilan bog‘liq holda tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqot materiallari va metodikasi. Tadqiqot obyekti sifatida shisha substratlar ustiga DC-magnetron changlatish (fizik bug‘lanish cho‘ktirish, PVD) usulida cho‘ktirilgan CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalari olindi [5]. Plyonkalarning optik yutilish spektrlari xona haroratida 190-1100 nm to‘lqin uzunligi diapazonida spektrofotometrik usulda o‘lchandi. Olingan eksperimental spektrlardagi tasodifiy shovqinlarni kamaytirish va xarakterli maksimumlarni aniqroq ajratib olish maqsadida ikkinchi tartibli, 9 nuqtali oynaga ega Savitskiy-Golay siljituvchi filtridan foydalanilgan. Spektrlardagi lokal maksimumlarning to‘lqin uzunligi qiymatlari fotonning energiyasiga $E = hc/\lambda$ formulasi bo‘yicha qayta hisoblab chiqilgan.

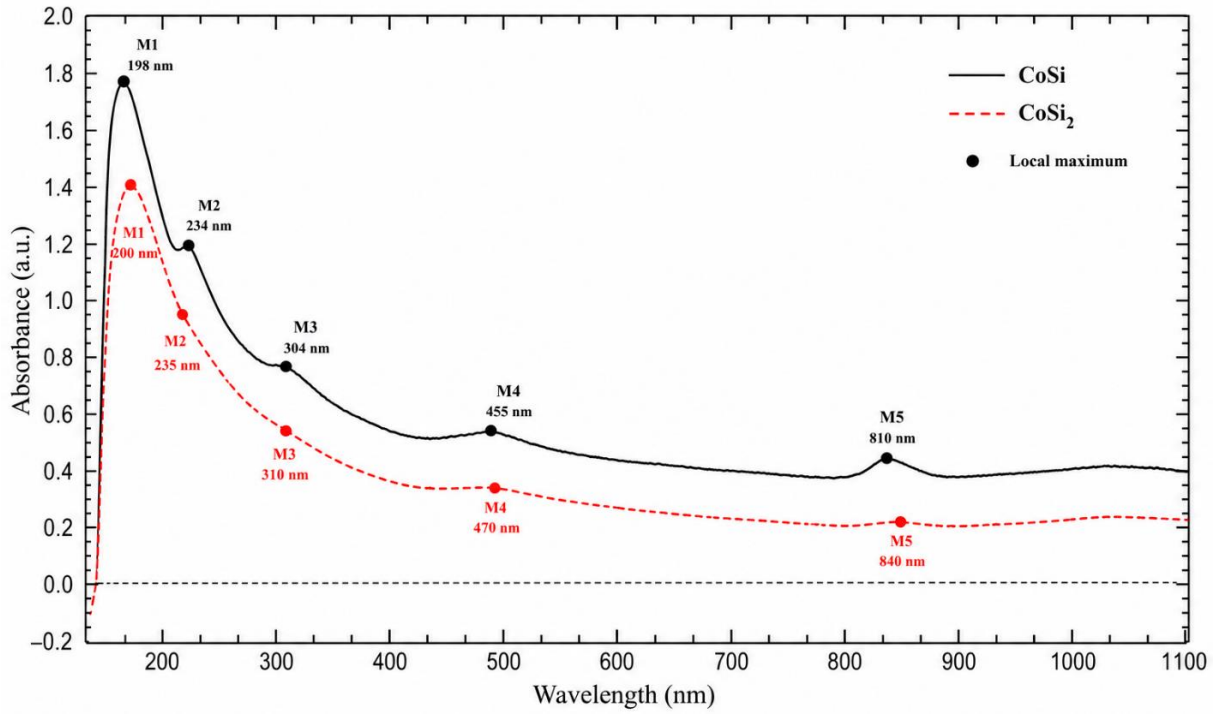
Natijalar va muhokama. Rasmda shisha substratlar ustiga DC-magnetron changlatish usulida cho‘ktirilgan CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalarining xona haroratidagi optik yutilish spektrlari keltirilgan. Ikkala spektr ham tadqiq qilingan 190-1100 nm oralig‘ining butun uzunligi bo‘yicha cho‘zilgan keng yutilish polosalarini namoyon etadi, bu esa tushayotgan elektromagnit nurlanishning kobalt silitsidi fazalarining elektron holatlari bilan kuchli o‘zaro ta’sirlashuvidan dalolat beradi. Spektrlarning umumiy profili sifat jihatidan o‘xshash bo‘lib, bu ikkala birikmada ham umumiy Co-Si bog‘lanishi va metall xarakteridagi elektron tuzilmaning mavjudligini aks ettiradi, biroq xarakterli yutilish xususiyatlarining joylashuvi va intensivligida sezilarli farqlar kuzatiladi. Bu farqlar optik javobning har bir kobalt silitsidi fazasining kristall tuzilmasiga kuchli bog‘liq ekanligini ko‘rsatadi.

Ikkala plyonka uchun eng kuchli optik yutilish ultrabinafsha sohasida kuzatiladi. Asosiy yutilish maksimumlari CoSi uchun ~280 nm, $CoSi_2$ uchun esa ~260 nm atrofida joylashgan bo‘lib, ularga mos eksperimental yutilish qiymatlari mos ravishda 2,238 va 2,216 ni tashkil etadi. Maksimal yutilish qiymatlari deyarli bir xil bo‘lsa-da, $CoSi_2$ ning ultrabinafsha maksimumi CoSi nikiga nisbatan qisqa to‘lqin uzunligi tomon taxminan 20 nm ga siljigan, bu esa foton energiyasining taxminan 0,34 eV ga oshishiga mos keladi. Bunday spektral siljish ikkala kobalt silitsidi fazasining elektron zonalar tuzilmasidagi farqlarni ko‘rsatadi va ularning turlicha kristallografik joylashuvi band va bo‘sh elektron holatlarning taqsimotiga ta’sir qilishini aks ettiradi.

Asosiy ultrabinafsha maksimumidan tashqari, ikkala spektr ham ko‘rinadigan soha tomon cho‘zilgan keng spektral xususiyatlarni namoyon etadi. CoSi da ~335 nm atrofida yelka shaklidagi xarakterli xususiyat kuzatilsa, $CoSi_2$ da unga mos xususiyat ~355 nm ga siljigan. Uzunroq to‘lqin uzunliklarida ikkala material o‘zini tubdan farqli tutadi: CoSi spektrida ~583 nm atrofida kuchsiz, biroq aniq ajraladigan spektral xususiyat saqlanib qoladi, $CoSi_2$ dagi unga mos uzun to‘lqinli xususiyat esa ~450 nm atrofida kuzatiladi. Bu

farqlar to‘lqin uzunligi ortishi bilan optik spektral og‘irlikning qayta taqsimlanishi ikkala silitsid fazasining kristall tuzilmasi va kimyoviy bog‘lanishiga sezilarli darajada bog‘liq ekanligini ko‘rsatadi.

CoSi yupqa plyonkasi tadqiq qilingan spektral diapazonning katta qismida $CoSi_2$ ga nisbatan yuqoriroq yutilishni namoyon etadi. Eng kuchli yutilish ultrabinafsha sohasida kuzatiladi, bunda ikkala material ham to‘lqin uzunligi qisqarishi bilan yutilishning tez ortishini ko‘rsatadi. Bunday xatti-harakat o‘tish metallari silitsidlarida keng tarqalgan bo‘lib, yuqori foton energiyalarida zonalararo optik o‘tishlar ehtimolining ortishi bilan bog‘liq. Ko‘rinadigan va yaqin infraqizil sohalarda esa yutilish intensivligining o‘zgarishi ancha silliq kechadi, bu esa mazkur spektral intervallarda optik javob alohida optik o‘tishlar emas, balki elektron holatlarning kengroq taqsimoti bilan boshqarilishidan dalolat beradi.



1-rasm. CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalarining har bir material uchun aniqlangan xarakterli spektral xususiyatlari (M1-M4) ko‘rsatilgan optik yutilish spektrlari

Eksperimental spektrlardan aniqlangan asosiy spektral xususiyatlarning miqdoriy taqqoslamasi 1-jadvalda keltirilgan. Har bir material uchun eksperimental ekstremumlar holati va spektral profildagi o‘zgarishlar asosida to‘rttadan xarakterli xususiyat ajratib olindi. CoSi plyonkasi uchun bu xususiyatlar taxminan 230, 280, 335 va 583 nm da joylashgan bo‘lib, ularga mos foton energiyalari mos ravishda 5,39, 4,43, 3,70 va 2,13 eV ni tashkil etadi. $CoSi_2$ spektrida esa taxminan 220, 260, 355 va 450 nm da mos keluvchi xarakterli xususiyatlar kuzatilib, ularga mos foton energiyalari 5,64, 4,77, 3,49 va 2,76 eV ga teng.

1-jadval. CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalarining xona haroratidagi optik yutilish spektrlaridan aniqlangan xarakterli spektral xususiyatlari

Xususiyat	CoSi: λ (nm)	CoSi: hν (eV)	CoSi: A	$CoSi_2$: λ (nm)	$CoSi_2$: hν (eV)	$CoSi_2$: A
M1	230	5,39	1,958	220	5,64	1,021
M2	280	4,43	2,238	260	4,77	2,216
M3	335	3,70	1,405	355	3,49	0,734
M4	583	2,13	1,906	450	2,76	1,220

Umuman olganda, eksperimental yutilish spektrlari CoSi va CoSi2 ning kimyoviy tarkibi o‘xshash bo‘lishiga qaramay, ultrabinafsha va ko‘rinadigan spektral sohalarda ularning optik javobi tubdan farq qilishini ko‘rsatadi. Xarakterli spektral xususiyatlarning tizimli siljishlari va yutilish qiymatlaridagi farqlar elektron tuzilmaning fazaga bog‘liq o‘zgarishi haqida aniq eksperimental dalil beradi. Bir-biriga yaqin joylashgan spektral xususiyatlarni yanada aniq ajratish va keng yutilish polosalari bilan bog‘liq noaniqlikni kamaytirish maqsadida eksperimental spektrlarni birinchi hosila spektroskopiyasi usulida qo‘shimcha tahlil qilish maqsadga muvofiqdir.

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqot natijasida DC-magnetron changlatish usulida shisha substratlarga cho‘ktirilgan CoSi va $CoSi_2$ yupqa plyonkalarining xona haroratidagi optik yutilish spektrlari 190-1100 nm diapazonida o‘rganildi va quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

- Ikkala plyonka ham tadqiq qilingan butun spektral diapazon bo‘yicha keng yutilish polosalarini namoyon etadi, bu Co-Si bog‘lanishiga xos umumiy metall xarakteridagi elektron tuzilmani tasdiqlaydi;
- Eng kuchli yutilish ultrabinafsha sohasida kuzatilib, $CoSi_2$ ning asosiy maksimumi CoSi nikiga nisbatan ~20 nm (~0,34 eV) qisqa to‘lqin uzunligi tomon siljigan;
- Har bir material uchun to‘rttadan (M1–M4) xarakterli spektral xususiyat aniqlandi, ularning holati va intensivligi ikki faza o‘rtasida sezilarli farq qiladi, xususan, uzun to‘lqinli xususiyat CoSi da ~583 nm da, $CoSi_2$ da esa ~450 nm da kuzatiladi;
- CoSi umumiy holda $CoSi_2$ ga nisbatan yuqoriroq yutilish darajasiga ega, bu ularning turli amaliy vazifalar masalan, optoelektron detektorlar va nurni himoya qiluvchi qoplamalar uchun tanlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, CoSi va $CoSi_2$ ning o‘xshash kimyoviy tarkibiga qaramay, ularning kristall tuzilmasidagi farq elektron zonalar taqsimotiga va, natijada, optik xossalarga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Kelgusi tadqiqotlarda spektrlarni birinchi hosila usulida tahlil qilish hamda Tauk (Tauc) usuli asosida optik taqiqlangan zona kengligini aniqlash orqali ikkala fazaning elektron tuzilmasi haqidagi tasavvurlarni yanada chuqurlashtirish mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. Murarka S.P. Silicides for VLSI Applications. New York: Academic Press, 1983.

2. Rosser P.J., Tomkins G.J. Silicides for VLSI interconnects // Vacuum. 1985. Vol. 35. P. 419–434. https://doi.org/10.1016/0042-207X(85)90361-6

3. Murarka S.P., Gutmann R.J., Kaloyeros A.E., Lanford W.A. Silicides for Integrated Circuits and Microelectronics. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1989.

4. Lavoie C., d’Heurle F.M., Detavernier C., Cabral C. Jr. Towards implementation of a nickel silicide process for CMOS technologies // Microelectronic Engineering. 2003. Vol. 70. P. 144–157. https://doi.org/10.1016/S0167-9317(03)00380-0

5. Mattox D.M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew, 2010. https://doi.org/10.1016/C2009-0-18800-1

6. Massalski T.B. (Ed.). Binary Alloy Phase Diagrams. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990.

7. Villars P. Pearson’s Handbook: Desk Edition Crystallographic Data for Intermetallic Phases. Materials Park, OH: ASM International, 1997.

8. Jain A., Ong S.P., Hautier G., Chen W., Richards W.D., Dacek S., Cholia S., Gunter D., Skinner D., Ceder G., Persson K.A. Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation // APL Materials. 2013. Vol. 1. Art. 011002. https://doi.org/10.1063/1.4812323

9. Toher C., Hicks D., Mehl M.J., Esters M., Oses C., Levy O., Hart G.L.W., Curtarolo S. The AFLOW Library of Crystallographic Prototypes: Part 3 // Computational Materials Science. 2021. Vol. 199. Art. 110450. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110450

10. Chang G., Wieder B.J., Schindler F., Sanchez D.S., Belopolski I., Huang S.-M., Singh B., Wu D., Neupert T., Chang T.-R., Xu S.-Y., Lin H., Hasan M.Z. Topological quantum properties of chiral crystals // Nature Materials. 2018. Vol. 17. P. 978–985. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0169-3

11. Takane D., Wang Z., Souma S., Nakayama K., Nakamura T., Oinuma H., Nakata Y., Iwasawa H., Cacho C., Kim T., Horiba K., Kumigashira H., Takahashi T., Ando Y., Sato T. Observation of chiral fermions with a large topological charge and associated Fermi-arc surface states in CoSi // Physical Review Letters. 2019. Vol. 122. Art. 076402. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.076402

12. Rao Z., Li H., Zhang T., Tian S., Li C., Fu B., Tang C., Wang L., Li Z., Fan W., Li J., Huang Y., Liu Z., Long Y., Fang C., Weng H., Shi Y., Lei H., Sun Y., Qian T., Ding H. Observation of unconventional chiral fermions with long Fermi arcs in CoSi // Nature. 2019. Vol. 567. P. 496–499. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1031-8

13. Kudryavtsev Y.V., Oksenenko V.A., Lee Y.P., Rhee J.Y., Kim Y.D. Optical properties of Co silicides: Experiment and density functional theory // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 102. Art. 103503. https://doi.org/10.1063/1.2812552

14. Wu Z.-C., Arakawa E.T., Olmstead M.A., Zanzucchi P.J., Garner C.M. Optical properties of epitaxial CoSi2 on Si from 0.062 to 22.3 eV // Physical Review B. 1993. Vol. 47. P. 4356–4362. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.4356

15. van der Marel D., Damascelli A., Schulte K., Menovsky A.A. Spin, charge, and bonding in transition metal mono-silicides // Physica B. 1998. Vol. 244. P. 138–147. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(97)00476-6

16. Xu B., Fang Z., Sánchez-Martínez M.-Á., Venderbos J.W.F., Ni Z., Qiu T., Manna K., Wang K., Paglione J., Bernhard C., Felser C., Mele E.J., Grushin A.G., Rappe A.M., Wu L. Optical signatures of multifold fermions in the chiral topological semimetal CoSi // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. P. 27104–27110. https://doi.org/10.1073/pnas.2010752117

17. Sánchez-Martínez M.-Á., de Juan F., Grushin A.G. Linear optical conductivity of chiral multifold fermions // Physical Review B. 2019. Vol. 99. Art. 155145. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.155145

18. Sharipov M., Hayitov D., Fayziev S., Ahadov A., Dzhuraev D. Optical absorption, Raman spectroscopy, and surface morphology of Dy3Fe5O12 single crystals // Physics Open. 2026. Vol. 27. Art. 100420. https://doi.org/10.1016/j.physo.2026.100420

19. Sharipov M.Z., Nizomova Sh.K., Fayziyev Sh.Sh., Dzhuraev D.R. Optical absorption and Raman spectroscopy of HoFe3(BO3)4 ferroborate: Experimental study with thermodynamic analysis // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2026. Vol. 17. — P. 304–310. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2026-17-3-304-310