



UDC: 538.958:621.315.592

*G'ofur ESHONQULOV,*  
*O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti*  
*E-mail: g.eshonqulov@nuu.uz*  
**Rivojiddin JALOLOV,**  
*O'z RFA Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi*

*O'zMU dotsenti R.Vildanov taqrizi asosida*

## INVESTIGATION OF THE CRYSTALLOGRAPHIC AND OPTICAL PROPERTIES OF SULFUR-DOPED ZINC OXIDE NANOSTRUCTURES

Annotation

The advancement of nanotechnology is closely tied to the development and refinement of methods for synthesizing nanostructured materials. Currently, there are more than a thousand types of methods for synthesizing nanomaterials, among which the hydrothermal method is of particular importance due to its simplicity and economic cost. At the same time, the hydrothermal method opens up significant technological possibilities for doping synthesized nanomaterials with atoms of foreign elements. Among nanostructured materials, zinc oxide (ZnO) is of particular importance due to its unique physicochemical properties. The main drawback of ZnO nanostructures is their large band gap. Therefore, the reduction of their band gap by introducing sulfur atoms into ZnO nanostructures was studied in this work.

**Keywords:** Hydrothermal, S-doped ZnO, band gap, defects, photoluminescence.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННЫХ СЕРОЙ

Аннотация

Синтез наноматериалов и изучение их фундаментальных физико-химических свойств, лежащих в основе развития нанотехнологий, является одной из актуальных задач. Синтез наноструктур ZnO, легированных серой, открывает возможность дальнейшего улучшения свойств базового полупроводникового материала. В данной работе исследованы морфологические, кристаллографические, оптические и фотолюминесцентные свойства наноструктур ZnO, легированных серой. Установлено, что введение атомов серы в наноструктуры ZnO приводит к сужению ширины запрещенной зоны и появлению дефектов в кристаллической решетке.

**Ключевые слова:** гидротермальный метод, легированный S ZnO, запрещенная зона, дефекты, фотолюминесценция.

## OLTINGUGURT KIRITILGAN RUX OKSIDI NANOSTRUKTURALARINING KRISTALLOGRAFIK VA OPTIK XOSSALARINI TADQIQ QILISH

Annotatsiya

Nanotexnologiyalarning rivojlanishi uchun asos bo'luvchi nanomateriallarni sintez qilish va ularning fundamental fizik- kimyoviy xossalarni tadqiq qilish bugungi kunning dolzarb masalalaridan biridir. Oltingugurt kiritilgan ZnO nanostrukturalarini sintez qilish orqali asos yarimo'tkazgich materialning xususiyatlarini yanada oshirish imkoniyati mavjud. Ushbu tadqiqot ishida oltingugurt atomlari kiritilgan ZnO nanostrukturalarining morfologik, kristallografik, optik va fotolyuminessent xossalari tadqiq qilingan. ZnO nanostrukturalariga oltingugurt atomlarini kiritish tadqiqlangan zona kenglini kamaytirishi va kristal panjarada nuqsonlar hosil qilishi aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** Hidrotermal, S-kiritilgan ZnO, taqiqlangan zona kengligi, nuqsonlar, fotolyuminessensiya.

**Kirish.** Bugungi kunda, jahonda metal oksidi nanostrukturalarini sintez qilish hamda ularning fundamental va amaliy xususiyatlarini tadqiq qilishga bo'lgan qiziqish kundan-kunga ortib bormoqda. Metal oksidlari orasida rux oksidi (ZnO) o'zining noyob fizik- kimyoviy xususiyatlari va kimyoviy jihatdan barqarorligi sababli alohida ahamiyatga ega. Suvli eritmlarda ZnO nanostrukturalarining kristallanishi, o'rtacha sharoitlari, namunalarning strukturaviy xususiyatlari va samarali kristallanish jarayoni o'rtasidagi yaqin bog'liqlik tadqiqotchilar tomonidan keng o'rganilmoqda [1]. Shu sababli, ZnO ning monokristallari, kukunlari, nanostrukturalari yoki yupqa plyonkalari ko'rinishida o'rganishga bo'lgan qiziqish yuqori hisoblanadi [2]. ZnO ning turli xil nanostrukturalari, jumladan nanorodlar [3], nanokukunlar [4] va nanonaychalari [5] muvafaqqiyatli sintez qilingani haqida ko'plab tadqiqotchilar o'zlarining ishlarida ta'kidlab o'tishgan.

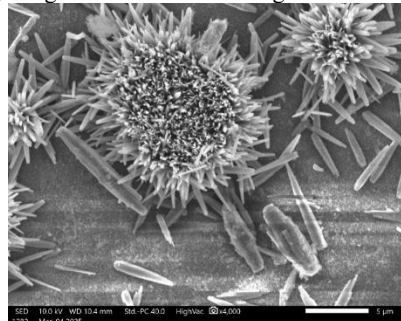
Ammo, ZnO strukturalarining parametrlarini yanada yaxshilash uchun ularga metall bo'lmagan kirishma atomlarini kiritish va ularning fotokatalitik, optik va elektr xususiyatlarini oshirish yuzasidan muhokamalar olib borilmoqda [6]. Hozirgi kunda oltingugurt (S) qo'shilgan ZnO potentsial ravishda atrof-muhit ifloslanishini bartaraf etishda sanarali ekanligi to'g'risida tadqiqotlar olib borilmoqda. Yuqori elektromanfiylik, shuningdek, olyungugurt va kislorod o'rtasidagi ion radiusining katta nomuvofiqligi tufayli oltingugurt atomlarini ZnO ga kiritilishi asos yarimo'tkazgich materialning optik va strukturaviy xususiyatlarini o'zgartiradi [7-8]. Shu sababli, oltingugurt kiritilgan ZnO nanostrukturalarini sintez qilish va ularning xossalarni o'rganish dolzarb ilmiy masalalardan biridir.

**Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili.** ZnO taqiqlangan zona kengligi  $\sim 3,37$  eV va eksiton bog'lanish energiyasi ( $\sim 60$  meV) bo'lgan n-tipli II-IV guruh birikmalaridan tashkil topgan bo'lib, keng zonali yarimo'tkazgich materialdir [9]. Odatda, ZnO ning kristal strukturasi kislorod vakansiyalari va tugunlar orasida joylashgan ortiqcha rux atomlari mavjudligi sababli n-tipli yarimo'tkazgich sifatida tanilgan, ammo rux vakansiyalari klasterlarining shakllanishi yoki ularning boshqa tashqi nuqsonlar bilan birikmasi ZnO ni p-tipli yarimo'tkazgichga aylantirishi mumkin. Ikkala holatda ham Fermi sathlari nuqsonlarning konsentratsiyasiga qarab boshqarilishi mumkin, bu nafaqat ZnO funksionalligini o'zgartirishga, balki tizimni zaryadlash jarayonlariga nisbatan barqarorlashtirishga ham imkon beradi [10]. Strukturadagi kislorod atomlarini anionlar bilan o'zaro almashtirish ZnO strukturasi ko'plab qiziqarli fizikaviy xususiyatlarni keltirib chiqarishi mumkin. Chunki anionlar nisbiy ionli radiusga ega bo'lganligi sababli ular kristal panjarada joylashgan kislorod o'rni egallashi mumkin, bu esa valent va o'tkazuvchanlik zonalarning energetik holatlarini o'zgarishiga olib keladi, bu esa o'z navbatida nanomaterialning optik, elektrik va magnit xususiyatlarini yaxshilashga xizmat qiladi. Anionlar orasida kam o'rganilgan element oltingugurt ( $S^{2-}$ ) bo'lib, S kiritilgan ZnO yupqa plyonkalari shaffof oksidli qatlamlarda yorug'likni yutish chegarasining to'liq uzunligini samarali o'zgarishiga, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi yaxshilanishiga va fotokatalitik samaradorlikka ega bo'lgan [11]. Sintezdagi texnologik muammolardan tashqari, S-kiritilgan zaryad tashuvchisi xarakteriga yoki ZnO nanostrukturalarining optik xususiyatlariga ta'siri va p-tipli o'tkazuvchanlikni samarali hosil qilish imkoniyatlari uzoq vaqtdan beri muhokama qilinmoqda: oltingugurt kiritilgan namunalarni o'z ichiga olgan va azot kiritilganda p-tipli o'tkazuvchanlikni kuchaytirishning mumkin bo'lgan yo'li sifatida qaralmoqda [12-13].

**Tadqiqot metodologiyasi.** S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining sintez jarayoni quyidagicha amalga oshirildi. 25 mM konsentratsiyali rux nitrat geksagidrat va 25 mM konsentratsiyali geksametilentetraminning 20 ml hajmdagi deionlashtirilgan suvdagi eritmasi tayyorlandi. So'ngra, 25 mM konsentratsiyali tioasetamid ( $C_2H_5NS$  (Sigma Aldrich)) ning 2 ml deionlashtirilgan suvdagi eritmasi tayyorlandi. Tayyor bo'lgan barcha eritmalar qo'shilib 10 minut davomida magnit aralashtirgich yordamida bir jinsli eritma holiga kelgunicha aralashtirildi. Olingan suspenziya teflon qoplamali zanglamaydigan po'latdan yasalgan avtoklavga o'tkazildi. Tayyorlangan eritma bilan teflon qoplamali zanglamaydigan po'latdan yasalgan avtoklavning pastki qismiga kvarts tagliklarilari ketma-ket joylashtirildi. Zanglamaydigan po'latdan yasalgan avtoklav zich yopildi va  $90^\circ C$  haroratli suv bilan termostabilizatsiyalangan rezervuarga joylashtirildi. Sintez davomiyligi 5 soatni tashkil qiladi. S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining sintezi tugaganidan so'ng, avtoklav termostabilizatsiyalangan rezervuardan chiqarildi va xona haroratigacha tabiiy holda sovutildi. Sovutilgandan so'ng, namunalar avtoklavdan olinadi va ochiq havoda quritildi.

Nanostrukturalarining morfologiyasi skanlovchi elektron mikroskop (SEM) Jeol IT 210LA yordamida aniqlandi. S- kiritilgan ZnO ning strukturaviy xossalari MINIFLEX-600 difraktometrida (Rigaku) rentgen nurlari diffraksiyasi (XRD) spektrlari yordamida tahlil qilindi. Namunalarning optik xarakteristikalari UV/Vis 5100 spektrometrida 190-1100 nm to'liq uzunligi oralig'ida xona haroratida tadqiq qilindi. S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining fotoluminesensiya spektrlarini qayd qilishda uyg'otuvchi manba sifatida impulsli azot lazeridan, spektral qurilma sifatida MDR-23 monoxramatoridan va fotoluminesensiya impulslarini qayd qilishda Boxcarintegratoridan foydalanildi.

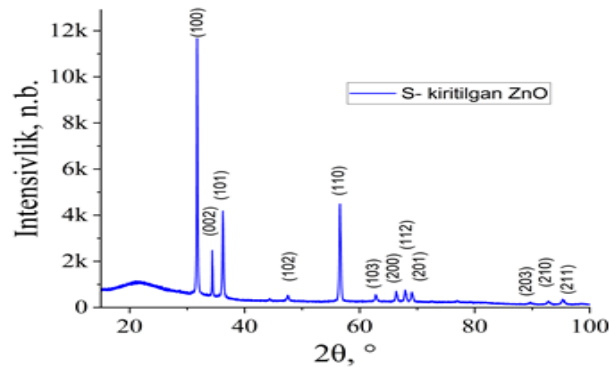
**Tahlil va natijalar.** Kvars shisha tagliklar yuzasida gidrotermal usulda sintez qilingan S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining SEM da olingan tasviri 1-rasmda keltirilgan. Tasvirlardan ko'rinadiki, S-kiritilgan ZnO nanostrukturallari "tipratikansimon" ko'rinishga ega bo'lib, geksagonal shaklda kristallangan.



**1-rasm.** S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining SEM da olingan tasviri.

Taglikka nisbatan tik o'sgan nanostrukturallarning alohida elementlari nanorod ko'rinishida bo'lib, ularning o'rtacha diametrlari 60-90 nm va uzunliklari 4-5  $\mu m$ . Shu bilan birga, taglikka nisbatan gorizontal joylashgan va alohida shakllangan S-kiritilgan ZnO mikrostrukturallari ham mavjudligi tasvirlardan ko'rinadi. Ularning diametrlari ikki uchi tomon kamayib boradigan urchuqsimon ko'rinishga ega bo'lib, markaziy qismlarining o'rtacha diametrlari 1-2  $\mu m$  va uzunliklari 5-7  $\mu m$  ni tashkil qiladi.

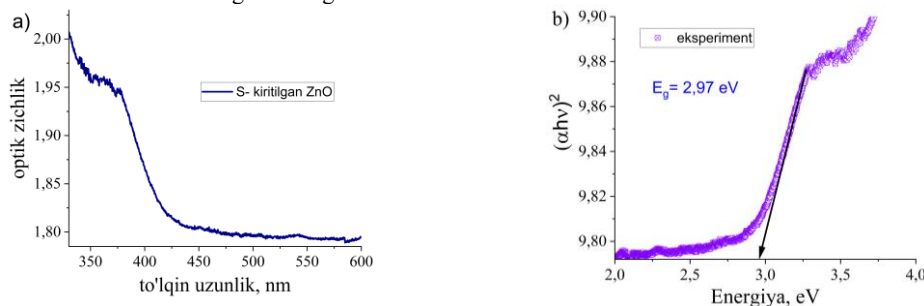
S-kiritilgan ZnO mikro va nanostrukturallarning kristallik xususiyatlarini tahlil qilish uchun ularning rentgen nurlar difraksiyon analizi o'tkazildi. S-kiritilgan ZnO mikro va nanostrukturallarning rentgen nurlar difraksiyon spektri 2-rasmda keltirilgan. S-kiritilgan ZnO nanostrukturallarning rentgen nurlar difraksiya spektrida  $2\theta = 31.72^\circ, 34.3^\circ, 36.15^\circ, 47.5^\circ, 56.52^\circ, 62.78^\circ, 66.34^\circ, 67.91^\circ, 69.11^\circ, 89.7^\circ, 92.79^\circ, 95.27^\circ$  burchaklarda (kristallografik tekisliklar grafikda keltirilgan) Bregg difraksiyon piklari kuzatildi. Olingan spektrda kuzatilgan barcha difraksiyon piklar ZnO ning geksagonal fazadagi kristall strukturasi tegishli bo'lib, panjara doimiylarining qiymati (JCPDS 36-1451) standart karta ma'lumotlariga yaqin.



2-rasm. S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining rentgen nurlar difraksiya spektri

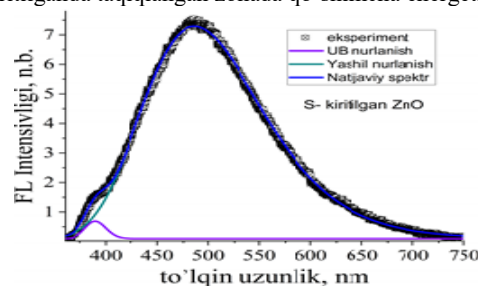
Rengten nurlar difraksiya spektrida ZnO ning boshqa kristallografik fazalari yoki kirishmaviy nuqsonlarga mos bo'lgan boshqa difraksiyon piklari kuzatilmadi. Rengten nurlar difraksiyon spektrida (100) kristallografik tekislikka mos bo'lgan difraksiya pikining qolganlariga nisbatan yuqori ekanligi ZnO mikro va nanostrukturalarining o'sish yo'nalishida a-o'qining ustuvor ekanligini ko'rsatadi. Tahlil natijalariga ko'ra, S-kiritilgan ZnO nanostrukturasining XRD spektrida kuzatilgan difraksiyon piklarning maksimumlari JCPDS 36-1451 sonli standart kartaga nisbatan biroz kichik burchaklarda ekanligi aniqlandi. Bu kichik qiymatli o'zgarish ZnO kristall panjarasiga S ionlarining qo'shilishidan dalolat beradi. Ushbu siljish ion radiusi kichik bo'lgan kislorod atomlari  $O^{2-}$  (0,14 nm) o'rniga ion radiusi katta bo'lgan oltingugurt atomlari  $S^{2-}$  (0,18 nm) ning joylashganligi natijasida yuzaga kelgan deb aytish mumkin. Adabiyotlar tahliliga ko'ra,  $2\theta = 47.5^\circ$  va  $56.52^\circ$  burchaklarga mos bo'lgan Bregg difraksiyon piklari mos ravishda ZnS ning [220] va [311] tekisliklariga ham tegishli bo'lishi mumkin. Ushbu natijalar ZnO nanostrukturalariga oltingugurt atomlari samarali kiritilganini izohlaydi. Shu bilan birga, S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining XRD spektrida difraksiyon piklarning intensivliklari yuqori va yarim kengliklarining torligi namunalarning kristallik sifati yuqori ekanligini ko'rsatadi.

S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining taqiqlangan zona kengligini aniqlash maqsadida ularning ultrabinafsha-, ko'zga ko'rinadigan sohalardagi optik zichlik spektrlari tadqiq qilindi. Oltingugurt kiritilgan ZnO nanostrukturalarining optik zichlik spektri va Tauch usuli yordamida hisoblangan taqiqlangan zona energiya kengligi 3-rasmga keltirilgan. S kiritilgan ZnO nanostrukturalarining yutilish spektri ko'zga ko'rinuvchi (~450-750 nm) sohada yutilish polosasiga ega emas (3a-rasm). S-kiritilgan ZnO nanostrukturalariga tushayotgan fotonning to'liq uzunligi ~ 450 nm (~2,82 eV) dan kichik qiymatlarda bo'lganda optik zichlik koeffitsiyenti keskin orta boshladi. Namunaga tushayotgan fotonning to'liq uzunligi ~ 368 nm (3,36 eV) ga teng bo'lganda optik zichlik koeffitsiyenti o'zining dastlabki maksimal qiymatiga erishdi. Bu pik asos element ZnO valent zonasidagi elektronlarni o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishiga mos keladi.



3-rasm. a) S kiritilgan ZnO nanostrukturalarining optik zichlik spektri va b) uning Tauch usuli yordamida aniqlangan taqiqlangan zona energiyasi.

O'rganilayotgan namunaga tushayotgan fotonning energiyasi ortishi bilan optik zichlik koeffitsiyentining qiymati yana orta boshladi. Ushbu jarayon ZnO nanostrukturalariga oltingugurt atomlarining kiritilishi bilan bog'liq hisoblanadi. S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining taqiqlangan zona energiyasi Tauch metodidan foydalanib aniqlandi. S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining taqiqlangan zona energiyasi  $E_g \approx 2,97$  eV ga teng bo'ldi (3b- rasm). Ma'lumki, ZnO ning taqiqlangan zona energiyasi 3.37 eV ga teng bo'lib, biz sintez qilgan S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining taqiqlangan zona kengligi undan 0.4 eV ga kichikdir. Bu esa ZnO nanostrukturalariga oltingugurt kiritilganda taqiqlangan zonada qo'shimcha energetik sathlar hosil bo'lishini tasdiqlaydi.



4-rasm. S-kirilgan ZnO nanostrukturalarining fotoluminessensiya spektri va uning Gauss tashkil etuvchilarga ajralishi.

Yarimo'tkazgich materiallarning elektron energetik sathlariga xususiy nuqsonlar va kirishmaviy atomlarning ta'sirini baholashda fotoluminescent spektroskopiya katta ahamiyatga ega hisoblanadi. S-kiritilgan ZnO nanostrukturalarining fotoluminesseksiya (FL) spektrlari 4-rasmda keltirilgan. Grafikdan ko'rinadiki, S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining FL spektri asosan yashil diapazonda joylashgan keng nurlanish polosasidan iborat. S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining FL spektrida mavjud bo'lgan nurlanish polosalarining tabiatini chuqurroq tushunish maqsadida u Gauss tashkil etuvchilarga ajratildi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, S- kiritilgan ZnO nanostrukturalarining FL spektri ikkita Gauss tashkil etuvchilardan tashkil topdi. Ulardan birinchisi maksimumi 389 nm to'liq uzunligida joylashgan kam intensivlik ega bo'lgan nurlanish polosasi hisoblanadi. Adabiyotlar tahliliga ko'ra, ushbu nurlanish polosasi ZnO strukturalarining erkin eksitonlariga tegishlidir [14]. FL spektridagi ikkinchi Gauss tashkil etuvchining maksimumi ~490 nm to'liq uzunligida joylashgan bo'lib yashil nurlanish polosasi deb ataladi. Yashil nurlanish polosasi ko'plab tadqiqotchilar tomonidan qayd qilingan nurlanish polosalaridan biri hisoblanadi [15]. Ushbu nurlanish polosasi mis kiritilgan rux oksidida birinchi marta kuzatilganligi sabab, yashil nurlanish polosasi mis ionlari hisobiga paydo bo'ladi deb hisoblashgan. Ammo, keyinchalik olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, mis kiritilmagan sof holatdagi ZnO nanostrukturalarida ham yashil nurlanish polosasi mavjud ekan. Shuningdek, tadqiqotlarda kiritilayotgan mis atomlarining konsentratsiyasi ortib borishi bilan yashil nurlanish polosasining intensivliklari o'zgarishi orasida hech qanday bog'liqlik yo'qligi aniqlandi. Ba'zi tadqiqotchilar yashil nurlanish polosasini vujudga kelishida rux vakansiyalari sabab bo'ladi deyishsa [16], boshqa tadqiqotchilar esa tugunlar orasida joylashgan ortiqcha rux va kislorod atomlarining kompleks nuqsonlariga tegishli deya nisbat berishadi [17]. Ammo, ko'plab tadqiqotchilar yashil nurlanish polosasi yuzaga kelishida asosiy sabab sifatida kislorod vakansiyalarini roli borligini alohida ta'kidlashadi. Xususan, bug' fazasidan kimyoviy cho'ktirish usulida sintez qilingan ZnO nanostrukturalarida sintez qilish sharoitining turli kislorod/rux nisbatlarida olingan natijalar yashil nurlanish polosasining vujudga kelishini tushunishga yordam berdi. Bundan tashqari ZnO nanostrukturalar yuqori haroratlarda qizdirilganda ham bu nurlanish polosasining intensivligi ortishi kuzatilgan. Olib borilgan tizimli tadqiqotlarning ko'plab natijalari kislorod vakansiyalari yashil nurlanish polosasining vujudga kelishida asosiy omil ekanligini ko'rsatgan. Bizning tadqiqot ishimizda ham oltingugurt atomlari kislorod atomlarining o'rnini egallashi natijasida kristal panjarada kislorod vakansiyalari hosil bo'lishi yuz bergan bo'lishi mumkin.

**Xulosa va takliflar.** Hidrotermal usulda S-kiritilgan ZnO mikro va nanostrukturallari muvafaqqiyatli sintez qilindi. S-kiritilgan ZnO nanostrukturallari "tipratkansimon" ko'rinishga ega bo'lib, uning taglikka nisbatan tik yo'nalishda o'sgan nanorod shaklida kristallangan qismining diametri 50-70 nm va uzunligi 3-5  $\mu\text{m}$ . Taglikka nisbatan gorizontal yo'nalishda yakka holatda o'sgan mikrostrukturallari asosan urchuqsimon ko'rinishda kristallangan bo'lib, o'rtacha diametrlari 1-2  $\mu\text{m}$  va uzunliklari 5-7  $\mu\text{m}$ . S-kiritilgan ZnO nanostrukturallarning XRD spektrida kuzatilgan barcha difraksiyon piklar ZnO ning geksoanal vyurtsit strukturasi tegishli ekanligini va namunaning kristallik sifati yuqori ekanligini ko'rsatdi. S-kiritilgan ZnO nanostrukturallarning taqiqlangan zona energiyasi 2.97 eV ga teng ekanligi ushbu strukturaga oltingugurt atomlari samarali kiritilganligini izohlaydi. ZnO nanostrukturallarga S atomlari kiritilishi uning kristal strukturasi nuqsonlarni hosil qilishi fotoluminescent spektroskopiya usulida aniqlandi.

#### ADABIYOTLAR

1. J. Wang, P.Y. Ma, L. Xiang, Effects of NaOH on formation of ZnO nanorods from e-Zn(OH)<sub>2</sub>. Mater. Lett. 141, 118–121 (2015)
2. M. Mouslmani, D. Patra, Modifying emission of ZnO nanoparticles in ZnO interceded polymer based hierarchical ordered nanocapsules. Mater. Lett. 143, 135–139 (2015)
3. J. Yang, Y.Q. Wang, T.T. Jiang, Y.C. Li, X.D. Yang, ZnO/Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> core-shell nanorod arrays: synthesis, properties and growth mechanism. Appl. Surf. Sci. 325, 117–123 (2015)
4. Y.Y. Lv, L.S. Yu, C.G. Li, L.S. Yang, ZnO nanopowders and their excellent solar light/UV photocatalytic activity on degradation of dye in wastewater. Sci. China Chem. 59, 142–149 (2016)
5. H. Lu, F. Zheng, M. Guo, M. Zhang, One-step electrodeposition of single-crystal ZnO nanotube arrays and their optical properties. J. Alloys Compd. 588, 217–221 (2014)
6. V. Kumari, A. Mittal, J. Jindal, S. Yadav, N. Kumar, Front. Mater. Sci. 13, 1 (2019)
7. X.-Y. Xie, P. Zhan, L.-Y. Li, D.-J. Zhou, D.-Y. Guo, J.-X. Meng, Y. Bai, W.-J. Zheng, J. Alloys Compd. 644, 383 (2015)
8. S. JanitabarDarzi, A. Mahjoub, A. Bayat, Int. J. Nano Dimens. 6, 425 (2015)
9. Ü. Özgür, D. Hofstetter, H. Morkoc, ZnO devices and applications: a review of current status and future prospects, Proc. IEEE 98 (7) (2010) 1255–1268.
10. Hewlett R.M., McLachlan M.A. Surface structure modification of ZnO and the impact on electronic properties, Adv. Mater., 28 (2016), pp. 3893–3921
11. Sreedhar, I.N. Reddy, Q.T. Hoai Ta, E. Cho, J.S. Noh, Insight into anions and cations effect on charge carrier generation and transportation of flake-like Co-doped ZnO thin films for stable PEC water splitting activity, J. Electroanal. Chem., 855 (2019), Article 113583
12. Kamioka, K., Kuriyama, K. & Kushida, K. Two shallow donors related to Zn interstitial in S-ion implanted ZnO epitaxial film. Solid State Communications 188, 12–14 (2014)
13. Persson, C., Platzer-Björkman, C., Malmström, J., Törndahl, T. & Edoff, M. Strong Valence-Band Offset Bowing of ZnO<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> Enhances p-Type Nitrogen Doping of ZnO-like Alloys. Physical Review Letters 97, 146403 (2006).
14. A. Esbergenova *et al.* Interlinking the Fe doping concentration, optoelectronic properties, and photocatalytic performance of ZnO nanostructures. *Curr. Appl. Phys.* 2024, 67 18–29
15. McCluskey M.D., Jokela S.J. Defects in ZnO, J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. №7. 071101.
16. Röhr, J.A., Sá, J. & Konezny, S.J. The role of adsorbates in the green emission and conductivity of zinc oxide. Commun Chem 2, 52 (2019)
17. Alrajhi, A.H., Ahmed, N.M., Halim, M.M. et al. Control repeatability synthesis of a new structure: nanoyarn in green synthesis of 3D ZnO NCs and its thermal time influence on optical properties. J Mater Sci: Mater Electron 35, 1118 (2024)