

MAGNETRON CHANGLATISH USULIDA Si (111) YUZASIGA O'STIRILGAN CuO QATLAMNING RENTGEN FAZAVIY VA MIKROSKOPIK TAHLILI.

I.O. Qosimov¹., Sh.T. Xojiyev²., O.A. Niyozova³., B.O'. Bobomurodov³.

¹*O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi O.S. Sodiqov nomidagi Bioorganik kimyo instituti, 100143, Toshkent, O'zbekiston*

²*Toshkent davlat tibbiyot universiteti, Farobiy ko'chasi, Toshkent, O'zbekiston,*

³*Termiz davlat universiteti, Termiz shahri, "Barkamol avlod" ko'chasi 43-uy*

¹isroil.kosimov.76@mail.ru

³boyqobil_86@umail.uz

Annotatsiya: Ushbu maqolada kremniy plastinkasi yuzasiga CuO yupqa qatlamlarini magnetron changlatish usulida qoplama qoplash, hamda hosil bo'lgan qatlamlarning tarkibiy, morfologik va kristallik xususiyatlarini tahlil qilish natijalari keltirilgan. Taglik sifatida p-Si(111) kremniy plastinkalari qo'llanildi. Yuzani adgeziyaga tayyorlash argon ionlari ta'siridagi plazma bilan amalga oshirildi. XRD tahlillari orqali va polikristalli monoklinik strukturali CuO hosil bo'lganligi va ularning difraktsiya cho'qqilari tenorite fazasiga mos kelishi tasdiqlandi. Xususan, CuO(111) ning yo'nalishidagi kuchli difraksion cho'qqilar, kristall donalarining bir xil va yirik ekanligini, hamda SEM va AKM tahlilidan qatlamlarining tarkibiy taqsimoti, yuqori darajadagi gomogenligi ichki stresslarsiz struktura hosil bo'lganini ko'rsatadi. Olingan natijalar CuO materialining fotokatalizatorlar, gazsensorlari, quyosh elementlari va fotogalvanik qurilmalarda samarali qo'llanilishi uchun yuqori salohiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: magnetron changlatish, CuO yupqa plyonka, p-Si(111), rentgen-fazaviy tahlil, SEM, AFM, tenorite fazasi, fotokataliz, gaz sensorlari, quyosh elementlari.

**РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЛОЯ
CuO, ВЫРАЩЕННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ Si (111) МЕТОДОМ
МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ.**

И.О. Косимов¹, Sh.T. Хожиев², О.А. Ниёзова³, В.О. Бобомуродов³

¹Институт биоорганической химии имени О.С. Содикова, Академия наук Республики Узбекистан, 100143, г. Ташкент, Узбекистан

²Ташкентский государственный медицинский университет, ул. Фараби, г. Ташкент, Узбекистан

³Термезский государственный университет, 190111, г. Термез, ул. «Баркамол авлод», дом 43, Узбекистан

¹isroil.kosimov.76@mail.ru

³boyqobil_86@umail.uz

Аннотация: В данной статье представлены результаты осаждения тонких плёнок CuO на поверхность кремниевой подложки методом магнетронного распыления, а также анализ их структурных, морфологических и кристаллических характеристик. В качестве подложек использовались пластины p-Si(111). Подготовка поверхности к адгезии осуществлялась обработкой в аргоновой плазме. По результатам рентгенофазового анализа (XRD) подтверждено формирование поликристаллической моноклинной структуры CuO, дифракционные пики которой соответствуют фазе тенорита. В частности, интенсивный дифракционный пик, соответствующий ориентации CuO(111), свидетельствует о формировании однородных и относительно крупных кристаллических зёрен. Данные сканирующей электронной микроскопии (SEM) и атомно-силовой микроскопии (AFM) показывают равномерное распределение структуры слоя, высокую степень гомогенности и формирование структуры без выраженных внутренних напряжений.

Полученные результаты подтверждают высокий потенциал материала CuO для эффективного применения в фотокатализаторах, газовых сенсорах, солнечных элементах и фотоэлектрических устройствах.

Ключевые слова: магнетронное распыление, тонкие плёнки CuO, p-Si(111), рентгенофазовый анализ, SEM, AFM, тенорит, фотокатализ, газовые сенсоры, солнечные элементы.

X-RAY PHASE AND MICROSCOPIC ANALYSIS OF THE CuO LAYER GROWN ON THE Si (111) SURFACE BY MAGNETRON SPUTTERING.

I.O. Kosimov¹, Sh.T. Khozhiev², O.A. Niyozova³, B.O. Bobomurodov³

¹*O.S. Sodikov Institute of Bioorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100143, Tashkent, Uzbekistan*

²*Tashkent State Medical University, Farabi Street, Tashkent, Uzbekistan*

³*Termez State University, 190111, Termez, “Barkamol Avlod” Street, 43, Uzbekistan*

¹isroil.kosimov.76@mail.ru

³boyqobil_86@umail.uz

Abstract: This article presents the results of depositing CuO thin films onto a silicon substrate surface by the magnetron sputtering method, as well as an analysis of their structural, morphological, and crystalline characteristics. p-Si(111) wafers were used as substrates. Surface preparation to improve adhesion was carried out by treatment in argon plasma. According to the results of X-ray diffraction (XRD) analysis, the formation of a polycrystalline monoclinic CuO structure was confirmed, with diffraction peaks corresponding to the tenorite phase. In particular, the intense diffraction peak corresponding to the CuO(111) orientation indicates the formation of homogeneous and relatively large crystalline grains. Scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) data demonstrate a uniform distribution of the layer structure, a high degree of homogeneity, and the formation of a structure without pronounced internal stresses.

The obtained results confirm the high potential of the CuO material for effective applications in photocatalysts, gas sensors, solar cells, and photoelectric devices.

Keywords: magnetron sputtering, CuO thin films, p-Si(111), X-ray phase analysis, SEM, AFM, tenorite, photocatalysis, gas sensors, solar cells.

Kirish

So‘nggi yillarda nanoo‘lchamdagi yarim o‘tkazgichli metall oksidlari va d-metallar bilan legirlangan materiallarga qiziqish ortib bormoqda. Xususan yarim

o'tkazgichli metall oksidlari va d-metallar nanomateriallari o'zining noyob geometriyasi, elektron tuzilishi, yuqori faol katalitikligi tufayli ilmiy izlanuvchining katta e'tiborini tortdi [1, 2, 3, 4]. Ushbu o'ziga xos xossalari ularni energetika sohasidagi tadqiqotlar qilish yo'nalishlarida foydali materiallar sifatida qo'llash imkonini beradi. [5, 6, 7, 8]. Metall oksidlarining yupqa plyonkalari va geterotuzilmalari XXI asr texnologiyalarida tub burilishlar yasadi. Xususan, ular yarim o'tkazgichlarga ishlov berish texnologiyasida yangi davrni boshlab berdi, yangi quyosh fotoelektrik elementlarini, zamonaviy gaz sensorlarini, biotibbiyot qurilmalarni yaratishga turtki bo'ldi va h.k. Bitta kation saqlovchi binar metall oksidlarini o'rganish juda muhim, chunki ularning tarkibini aniq boshqarish mumkin va tarkib o'zgarishiga mos ravishda material xossalardagi o'zgarishlarni oson kuzatish mumkin. Bundan tashqari, metall oksidlarining epitaksial yupqa plyonkalari va geterotuzilmalari taglik–plyonka chegarasida yangi funksional xossalarni namoyon qilishi mumkin. Xususan, mis(II) oksidi — (CuO) — turli sohalarda qo'llash imkoniyatiga ega bo'lgan muhim binar metall oksiddir. U tabiatda keng tarqalganligi, arzonligi hamda yuqori elektr, magnit, katalitik va optik xossalari tufayli energetik sohalarda muhim ahamiyat kasb etmoqda [9]. Mis havo ta'sirida oson oksidlanadi va natijada hosil bo'lgan mis oksidlari nooksid shakliga nisbatan yaxshiroq yorug'lik yutish qobiliyatiga ega boladi. Mis oksidining juda keng tarqalgan ikki shakli mavjud: CuO (mis(II) oksidi) — monoklin kristall tuzilishga ega, taqiqlangan zonasi 1,2–2,0 eV oralig'ida; Cu₂O (mis(I) oksidi) — kubik kristall tuzilishga ega, taqiqlangan zonasi 2,1–2,6 eV oralig'ida [10]. CuO nanozarrachalari odatda p-tip yarim o'tkazgich material sifatida keng tanilgan (asosiy zaryad tashuvchilar — elektronlar emas, balki teshiklar). U katod yoki fotokatod materiali sifatida ishlashi mumkin. CuO quyidagi sohalarda qo'llaniladi: energiyani yig'ish va saqlash [11], gaz sensorlari [12,13], litiy-ion batareyalari [14,15], maydon emissiya qurilmalari [16], fotoelektrik qurilmalar [17], o'ta otkazgichlar [18,19], antioksidantlar [20], fotokataliz, elektrokataliz va fotoelektrokataliz [21,22]. Biroq, energetik qurilmalarda katalitik samaradorlik va barqarorlik muammosi shundaki, CuO dan (Cu²⁺) osongina istalmagan holatiga Cu⁺

(Cu₂O) ga o'tishi mumkin. Shu bilan birga, mis oksidi maydon tranzistorlari va energiyadan tashqari xotira tizimlarida ham qo'llaniladi [23,24]. CuO tashqi energiya ta'sirida boshqa kristall fazalarga oson transformatsiyalanadi. Buni nazorat qilish uchun quyidagi lazer ablyatsiyasi [25], zol-gel [26], sonoximik [27], elektroximik [28], kimyoviy cho'ktirish [29] va biologik va biotibbiyot sohalarda ligand asosidagi [30] usullar qo'llangan. Yuqori sifatli, barqaror, monokristal, epitaksial CuO yupqa plyonkasini olish ilmiy amaliy jihatdan murakkab vazifa hisoblanadi. Turli sohalarda qo'llash uchun plyonkaning yuza tekisligi va qalinligining bir xilligi hal qiluvchi ahamiyatga ega. CuO yupqa plyonkalarini turli tagliklarga o'stirish uchun magnetronli changlatish [31], termik bug'lantirish [32] va elektroximik cho'ktirish [33] kabi usullar qo'llanilgan. Ular orasida magnetronli changlatish nisbatan arzonligi va yuqori takrorlanuvchanligi bilan ajralib turadi [34]. Bu usul impulsli lazerli cho'ktirish (PLD) va molekulyar-nurli epitaksiya (MNE) kabi usullarga nisbatan arzon va yuqori sifatli monokristal plyonkalar olish imkonini beradi [35]. Yupqa plyonka tayyorlangandan so'ng uning fizik-kimyoviy xossalarini tadqiq etish zarur. Masalan, energetik sohalarda qo'llanilishlarda barqarorlik va o'tkazuvchanlik muhim bo'lsa, ayrim qurilmalarida solishtirma qarshilik hal qiluvchi ahamiyatga ega. Shu bois, yupqa plyonkalar va geterotuzilmalarning morfologik tuzilishini tushunish juda muhim. Ushbu ishda kremniy tagliklarida CuO yupqa plyonkalari UVN-73 magnetronli changlatish qurilmasi yordamida o'stiriladi. CuO yupqa plyonkalarini o'stirish jarayonida taglik sirti miltillama razryad ionlari ta'sirida tozalanib olib borildi. Keyin CuO/Si plyonkalari o'stirilishidan oldin taglikni miltillama razryad ionlari bilan tozalash jarayoni taglikka termik ta'sir berishi tabiiy hol hisoblanadi. Bu jarayon plyonkaning fizik-kimyoviy, tuzilmaviy va morfologik xossalari hamda yuzadagi oksidlanish holatini sezilarli darajada o'zgartirdi. Tadqiqotlar rentgen difraksiyasi (XRD), skanerlovchi elektron mikroskopi (SEM), transmission elektron mikroskopida T(SEM) va Energodispers rentgen fluorensent spektroskopiya (EDRFS) usullari orqali amalga oshirildi. Plyonkaning yuza morfologiyasi atom-kuch mikroskopiyasi (AKM) yordamida aniqlandi. Olingan natijalar CuO yupqa plyonkalarining morfologik tuzilishini

batafsil ochib berdi va ulardan kelgusida optoelektron hamda energetik qurilmalarda hamda quyosh elementlari sohlarida qo'llanishi mumkin.

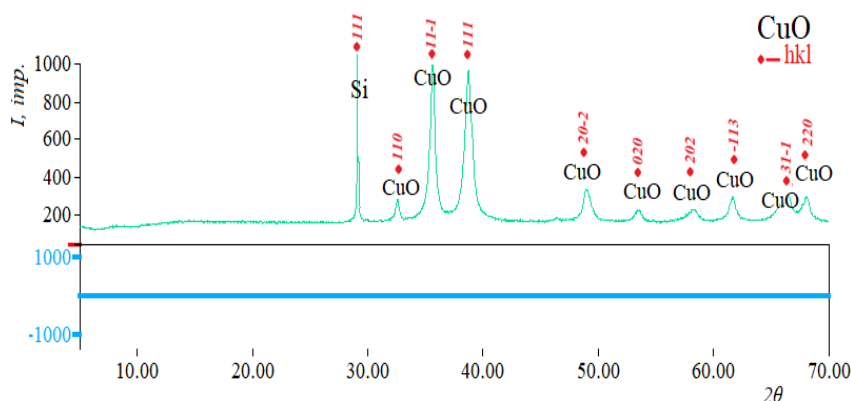
Tadqiqod metodologiyasi

Ushbu ishda kremniy plastinasi yuzasini CuO yupqa qatlami yotqizildi. Tayyorlash jarayonida plazma ta'sirida argon ionlari yordamida amalga oshirildi. Bu jarayonning maqsadi CuO yupqa qatlamining Si (kremniy) yuzasiga adgeziyasini faollashtirish hamda CuO qoplamasi bilan kremniy taglik yuzasida yupqa qatlam hosil qilishdan iborat edi. CuO yupqa qatlamlari magnetron ion changlatish manbai bilan jihozlangan UVM-73 vakuum qurilmasi yordamida qoplama qoplandi, bu [36] manbalarda ham ta'riflangan. Taglik sifatida, yuzi silliqlangan, kremniy (p-Si (111)) yo'nalishdagi plastinalar ishlatildi. Kremniy va mis materiallari o'zaro adgeziyalanishi uchun tekisliklararo masofasi o'rtacha Si uchun $d_{hkl} \approx 1.65 \text{ \AA}$, CuO uchun esa $d_{hkl} \approx 2,15 \text{ \AA}$ ga mos kelishi CuO qatlamlarini hosil qilish uchun zarur shart hisoblanadi. Difraksion cho'qqilarini olish uchun Cu $K\alpha$ nurlanishi ($\lambda = 1.540600 \text{ \AA}$) qo'llanildi. Olingan yupqa qoplamalar rentgen fazaviy tahlili Shimadzu (Yaponiya) kompaniyasining XRD-6100 rentgen difraktometrida, morfologiyasi tahlili SEM (Joel-210), tarkib zarrachalarining shakli va o'lchamlarini aniqlashda maydon emissiyasi (skanerlash) transmission elektron mikroskopida (Thermo Scientific Talos F200i (S)TEM 20-200 kV) hamda kimyoviy tarkibini aniqlash energiya dispers spektroskopiya EDS va Energodispers rentgen fluorensent spektroskopiya tahlili EDRFS, yuza morfologiyasi va undagi o'zgarishlarni atom-kuch mikroskopiyasi (AKM) yordamida amalga oshirildi.

Natijalar tahlili

Magnetron changlatish usulida Mis (II) oksidi (CuO) yupqa plyonkalari kremniy (Si) taglikga o'stirilgan nanostrukturaning rentgen difraksiyasi tahlili qilindi. Kremniy (Si) tagliklariga CuO o'stirilganda odatda polikristalli monoklinik strukturali CuO hosil bo'ladi va ularning difraktsiya cho'qqilari tenorite fazasiga mos keladi (JCPDS karta raqami 05-0661 yoki 45-0937) [37].

Si yuzasiga o‘stirilgan CuO ning rentgen faza tahlili “Search Match-4” dasturiy ta’minoti yordamida hisoblash natijalari 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. CuO/Si ning rentgenfaza tahlili

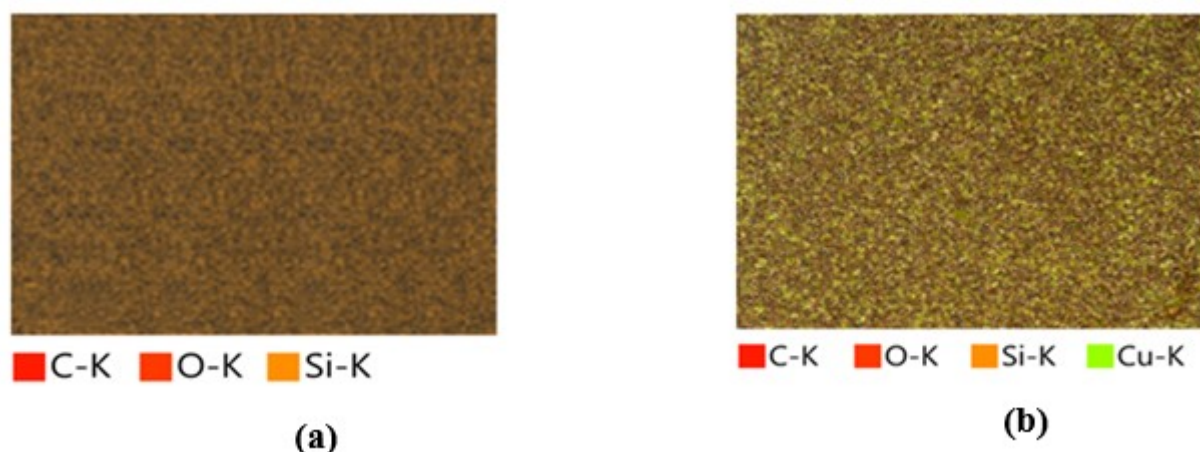
Ushbu difraktogrammada difraksiya burchaklari $2\theta = 28.44^\circ$ da Si(111), CuO ning xarakterli cho‘qqilari esa $2\theta = 32.51^\circ, 35.43^\circ, 38.79^\circ, 48.81^\circ, 53.47^\circ, 58.31^\circ, 61.54^\circ, 66.23^\circ, 68.19^\circ$ da (110), (11-1), (111), (20-2), (020), (202) (-113), (31-1) va (220) yo‘nalishlarda namoyon bo‘lganligi kuzatildi. “Search match” dasturiy tahliliga ko‘ra monoklinik (tenorit) kristalli CuO (simmetriya guruhi C2/c) ning difraksiy burchaklariga mos tekisliklariga (110), (002), (111), (202), (020), (202), (113), (311), (220), (311) va (044) to‘g‘ri keladi. Bu tahlillardan CuO magnetron changlatishda Si bilan yaxshi adgezyalanganligi va sof strukturaviy parametrlari hosil bo‘lganligini, bundan tashqari amorflik-18.23, kristallik darajalari -81.77 va kristallitlar o‘lchami teng ekanligini ko‘rsatadi 1-jadval.

1-ladval

No	Namunalar	Kristallik – amorflik darajasi (%)	Kristallitlar o‘lchami (nm)
1	Si/CuO	18.23-81.77	38-51

Tadqiqot ishimizda bir qatlamli epitaksial strukturali KDB 0.5- 1bk 2(III) standart kremniy taglikdan foydalanilgan bo‘lib, 2-(ab) rasmda taglik namuna Si ning va shu taglik yuzasiga qoplangan CuO plyonkasining SEM tasviri keltirilgan.

Ushbu 2-(a) tasvirdan Si taglikning va 2-(b) tasvirda esa CuO qoplatilganidan so‘ng yuza silliq va bir jinsli bo‘lib shakllanganligini namoyon qildi. Taglik Si ning tasviriga nisbatan Si qoplangan CuO plyonkasining 2b-rasmda SEM tasvirida mos keladigan och yashil nuqtalar hosil bo‘ganligidan sirt morfologiyasi yaqqol o‘zgarganligini ko‘rishimiz mumkin. Taglik Si sirt bilan solishtirganda, 2b-rasmda ko‘rsatilganidek, turli o‘lchamdagi taqsimotga ega aglomeratsiyalangan zarrachalar yoki tartibsiz klaster orollarining mavjudligi aniqlandi.

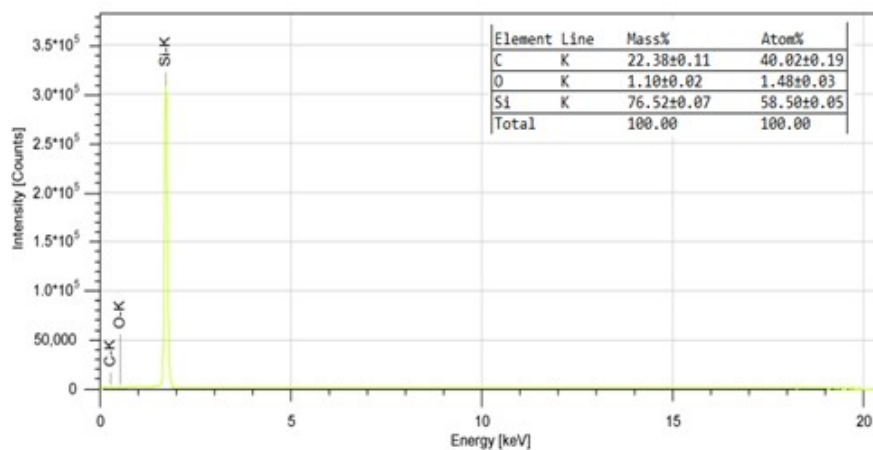


2-rasm. Si taglik (a) va CuO qoplangan plyonkasining SEM tasviri (b).

SEM tasvirida 2b-rasmdagi och yashil-CuO ga tegishli va jigarrang tusli Si zarrachalarning kombinatsiyalanganligidan CuO/Si tuzilma shakllanganligini yaqqol ko‘rishimiz mumkin.

Plyonka sirtlarining kimyoviy tarkibi EDS spektrlari o‘lchovlari yordamida o‘rganildi. EDS spektrida ikkala 4-5-rasmlarda ham SiKa, OKa, CKa va CuKa uchun aniq cho‘qqi aniqlandi va quyidagicha muhokama qilindi. Tahlil natijasiga ko‘ra

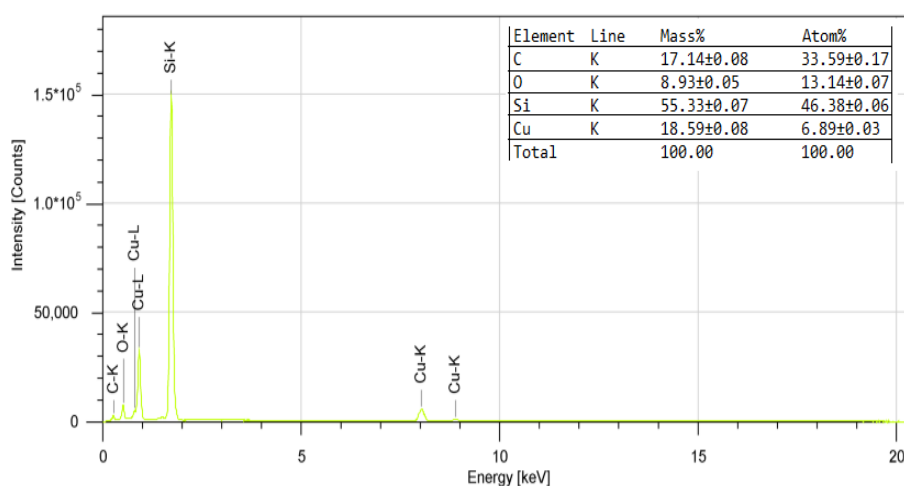
4-5 rasmda ushbu plyonkalar vakuum sharoitida olinganligiga qaramay sirtida uglerod mavjudligini ko‘rishimiz mumkin. Buni esa atrof-muhit sharoiti ta‘sirida ifloslangan yoki o‘lchash ishlari atmosfera muhitida amalga oshirilganligi sabab bo‘lishi mumkin deb baholashimiz mumkin. EDS spektrlarida O₂ ning mavjudligi Cu va O₂ ning magnetron changlatish paytida reaksiyasi kameraga kislorod haydash sharoitida oksidlanishi mumkinligi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.



4-rasm. Si taglikning EDS spektri

EDS spektrlari 4-rasmda Si taglikda SiK 1,75-1,85 keV energiyalarda -76.52%, C-22.38%, O-1.10% ekanligi hamda 5-rasmda taglikka o'stirilgan CuO/Si da esa C-17.14%, O-8.93%, SiK1,75-1,85 keV -55.33% va CuL 0,8-0,9 keV. 0,8-18.59% ga teng massa ulushda ekanligi aniqlangan.

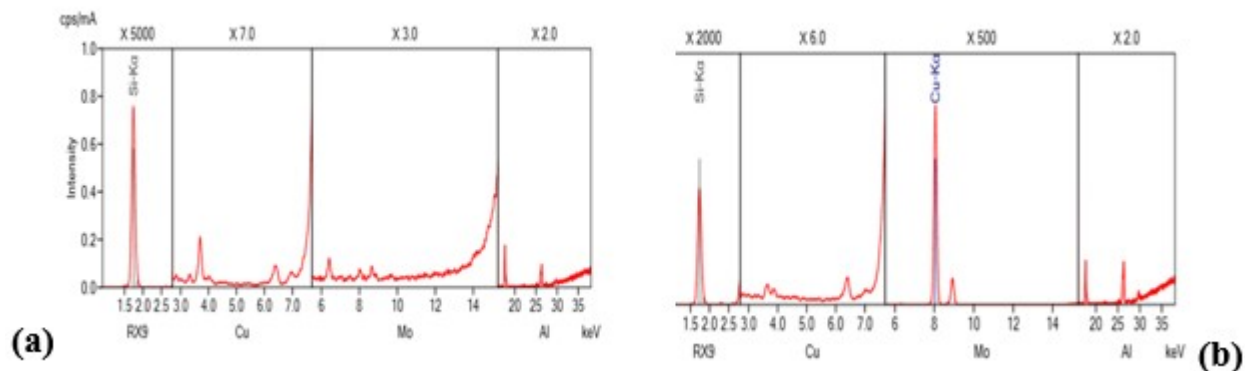
Xuddi shunday, atomlari ulushi ham yuqorilarga mos ravisha Si taglikda Si-58.50%, C-40.02 at%, O-1.48 at% ni taglikka o'stirilgan CuO/Si da C-33.59 at%, O-13.14 at %, Si-46.38 at% va Cu-6.38 at% tashkil qildi. Xulosa qilish mumkinki, taglikka o'stirilgan plyonkada Cu va O₂ larning foiz ulushi plyonka yuzasining turli mintaqalari va masshtablarida tartiblangan holda teng taqsimlanishiga erishilgan.



5-rasm. Si qoplangan CuO plyonkasining EDS spektri.

Ushbu yuqorida ta’kidlangan tahlil natijalari asosli ekanligining tasdig’i sifatida Si sirtiga o’stirilgan CuO namunaning energodispers rentgen fluorescent spektroskopiya tahlili (EDRFS) amalga oshirildi.

Energodispers rentgen fluorensent spektroskopiya tahlili (EDRFS)



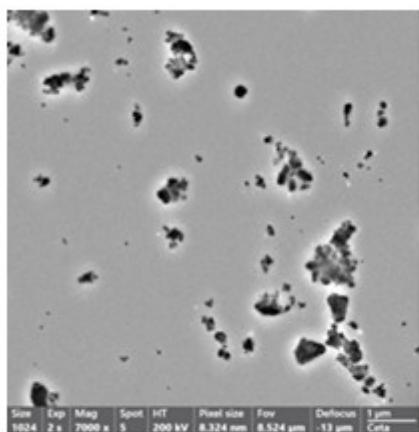
7-(a-b) rasm. Si taglik (a) va CuO qoplangan (b) namunalarning (EDRFS) tahlili.

Tahlil natijalaridan ko‘rinib turibdiki 7-(a) rasmda Si taglikga tegishli mos energiyalarda Si xarakterli cho‘qqilari 1.75 keV energiyada hamda 7-(b) rasmda CuO o’stirilgan namunada SiK -1,75-1.85keV va Cu – 8-8.8keV energiyalar oralig’ida mos cho‘qqillar namoyon bo‘lgan. Bundan tashqari namunalarning kimyoviy tarkibi energodispers rentgen fluorensent spektroskopiya tahlilidan (EDRFS) 1- jadvalda taglikda Si ning ulushi 100%, CuO o’stirilgan namunada esa Si ning ulushi 86,5 va CuO ning ulushi 13,5% ekanligi aniqlangan.

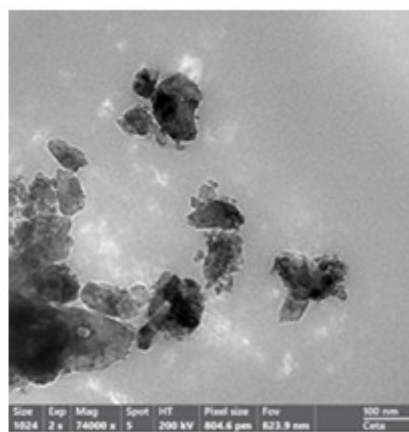
Si taglik va CuO o’stirilgan namunalarning kimyoviy tarkibi 1-jadval energodispers rentgen fluorensent spektroskopiya (EDRFS) usulida aniqlangan. Budan shunday xulosaga kelishimiz mumkinki SEM va EDS tahlili natijalari (EDRFS) tahlil natijalariga mos keladi va Si taglikka CuO yaxshi adgeziyalangan, Si va CuO atomlari o‘zaro birikib CuO/Si qatlam hosil qilgan, ikkala namunada ham o‘ziga tegishli kimyoviy tarkib mos ravshda shakllangan. S(TEM) va SEM tahlili CuO bilan qoplangan Si yuzasining morfologiyasini tushunish imkonini beradi. Cu bilan Si diffuziyasi yuzasi bo‘ylab orollar shaklida asta-sekin tarqalishi 6(ab) rasmda kuzatildi va bu haqida ba’zi adabiyotlarda ham aytib o‘tilgan [15].

No	Namunalar	Kimyoviy tarkibi (mass %)		O'lchashdagi xatolik ehtimoli
1	Si	100		0,0321
2	CuO/Si	Si	86.5	0.0321
		Cu	13.5	0.0206

Ushbu S (TEM) tasvirda 6-(b) ham Si/CuO namuna tarkibidagi katta o'lchamdagi kristallitlar uzluksiz o'sishi sababli yuza bo'ylab bir tekis taqsimlanganligini ko'rishimiz mumkin. S(TEM) spektrlaridan olingan Si tagligidagi Cu plyonkasining oksidlangan yuzasi rentgen diffraksiya tahlili, SEM tasviri va EDS spektrlaridan olingan natijalarga mos keldi. Bu mosliklar CuO yupqa plyonkalarining yuza gadir - budirligi va qatlamlarning o'lchamini yanada aniq bilishimiz uchun atom kuch mikroskopiyasi (AKM) qo'llanildi.



(a)

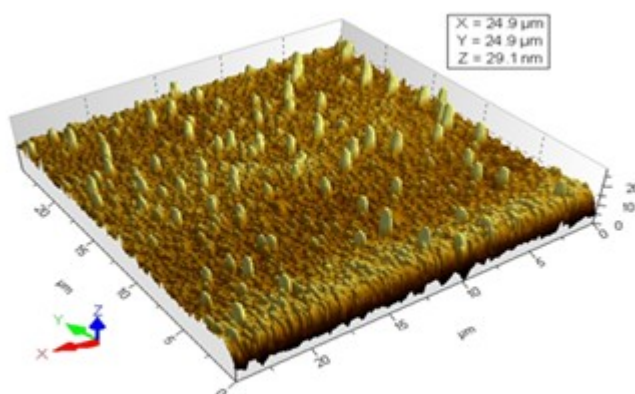


(b)

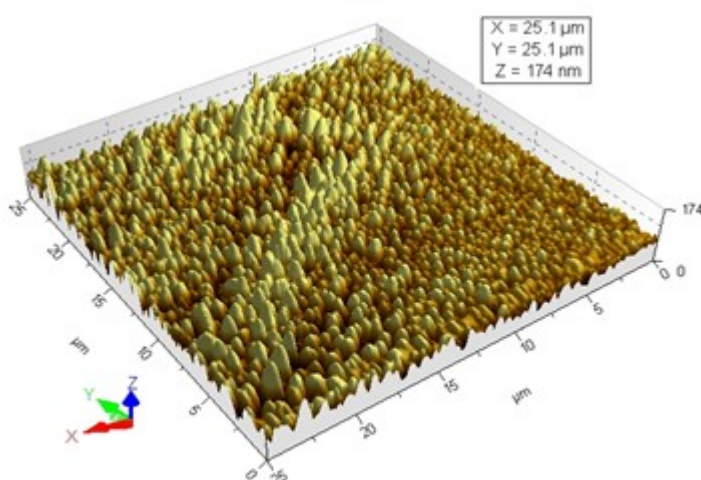
6-rasm. CuO ning kichik (a) va katta o'lchamdagi (b) kristallitlarning S (TEM) tasviri.

Atom kuch mikroskopi (AKM) natijalari shuni ko'rsatadiki, magnetron changlatish orqali yotqizilgan plyonkalar sirt bo'ylab o'ziga xos geometriyali va o'lcham taqsimotlariga ega morfologik jihatdan yuqori daragada shakllangan

nanoqatlam hosil bo'lganligini namoyish etadi. AKM topografik ma'lumotlariga asoslanib, sirt balandligining maksimal o'zgarishi taglik Si uchun taxminan 29,1 nm (7a-rasm), CuO qoplangan namuna uchun 174 nm (7b-rasm) ekanligi aniqlandi.



(a)



(b)

Bunda sirt relyefining shakllanishi plyonka o'sishi paytida termodinamik va kinetik omillarning murakkab o'zaro ta'siri, jumladan, Si va CuO ning atomlari diffuziyasi va kristal o'sish mexanizmlari bilan bog'liq. AKM yordamida o'tkazilgan tahlillardan Si taglik sirtida CuO plyonkalarining haqiqiy qalinligi mos ravishda taxminan 174 nm, o'sganligini tasdiqladi. AKM ma'lumotlari shuni ko'rsatadiki, plyonka qalinligi oshgani sayin, sirt nanostrukturalarining vertikal o'sishi sezilarli darajada o'zgaradi. Bu xatti-harakatlar to'g'ridan-to'g'ri Si va CuO atomlarning harakatchanligining oshishi, atomlar orasidagi masofa o'zaro

zichlashishi, o'sish markazlarining kinetik barqarorligi va ost qatlamlar ichidagi kristall o'sish suratlarining fazoviy o'zgarishi bilan bog'liq ekanligi baholandi.

Xulosa

Atom kuch mikroskopi yordamida olingan uch o'lchovli (3D) sirt morfologik tasvirlari plyonkalarining mikro va nanoo'lchamli sirt tuzilishi haqida batafsil ma'lumot beradi. Nanozarrachalar balandligi, o'lchamlari va sirt bo'ylab tarqalish zichligi kabi parametrlar materialning fizik va kimyoviy xususiyatlariga, jumladan, optik yutilish, yorug'likning tarqalishi, sirt elektron faolligi va fotokatalitik samaradorlikka kuchli ta'sir qiladi. Bu xususiyatlar Si sirtiga o'stirilgan CuO yupqa plyonkalarini quyosh batareyalari, optoelektron komponentlar, gaz sensorlari va fotodetektorlar yaratish tizimlarida qo'llash uchun juda mos keladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] Mote VD, Dargad JS, Purushotham Y, Dole BN (2015) Effect of doping on structural, physical, morphological and optical properties of $Zn_{1-x}Mn_xO$ nanoparticles. *Ceram Int* 41:15153
- [2]. Q. Lei, L. Huang, J. Yin, B. Davaasuren, Y. Yuan, X. Dong, Z.P. Wu, X. Wang, K.X. Yao, X. Lu, Y. Han// *Nat. Commun.*, 13 (2022), pp. 1-12
- [3]. M.A. Buckingham, W. Xiao, B. Ward- O'Brien, K. Yearsley, U. Zulfiqar, B.F. Spencer, A. Matthews, D.J. Lewis *J. Mater. Chem. C*, 11 (2023), pp. 4876-4891
- [4]. T. Hesabizadeh, N. Jebari, A. Madouri, G. Hallais, T.E. Clark, S.K. Behura, E. Herth, G. Guisbiers// *ACS Omega*, 6 (2021), pp. 33130-33140
- [5]. M.S.S. Danish, A. Bhattacharya, D. Stepanova, A. Mikhaylov, M.L. Grilli, M. Khosravy, T. Senjyu // *Metals*, 10 (2020), pp. 1-20
- [6]. M.A. Khan, N. Nayan, Shadiullah, M.K. Ahmad, C.F. Soon *Nanomaterials*, 10 (2020), pp. 1-18
- [7]. C. Marichy, M. Bechelany, N. Pinna *Adv. Mater.*, 24 (2012), pp. 1017-1032
- [8]. D. Zu, H. Wang, S. Lin, G. Ou, H. Wei, S. Sun, H. Wu *Nano Res.*, 12 (2019), pp. 2150-2163

- [9]. V. Chawla, N. Sardana, H. Kaur, A. Kumar, R. Chandra, S. Mishra Appl. Surf. Sci., 504 (2020), Article 144369
- [10]. C. Toparli, A. Sarfraz, A. Erbe Phys. Chem. Chem. Phys., 17 (2015), pp. 31670-31679
- [11]. M. Yurderi, A. Bulut, I.E. Ertas, M. Zahmakiran, M. Kaya Appl. Catal. B Environ., 165 (2015), pp. 169-175
- [12]. A. Nanda, V. Singh, R.K. Jha, J. Sinha, S. Avasthi, N. Bhat ACS Appl. Mater. Interfaces, 13 (2021), pp. 21936-21943
- [13]. O. Lupan, V. Postica, V. Cretu, N. Wolff, V. Duppel, L. Kienle, R. Adelung Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett., 10 (2016), pp. 260-266
- [14]. J. Zhou, L. Ma, H. Song, B. Wu, X. Chen Electrochem. Commun., 13 (2011), pp. 1357-1360
- [15]. A.K. Rai, L.T. Anh, J. Gim, V. Mathew, J. Kang, B.J. Paul, N.K. Singh, J. Song, J. Kim. J. Power Sources, 244 (2013), pp. 435-441
- [16]. J. Chen, S.Z. Deng, N.S. Xu, W. Zhang, X. Wen, S. Yang Appl. Phys. Lett., 83 (2003), pp. 746-748
- [17]. A. Bhaumik, A. Haque, P. Karnati, M.F.N. Taufique, R. Patel, K. Ghosh Thin Solid Films, 572 (2014), pp. 126-133
- [18]. A. Pendashteh, M.F. Mousavi, M.S. Rahmanifar Electrochim. Acta, 88 (2013), pp. 347-357
- [19]. Y. Li, K. Ye, K. Cheng, D. Cao, Y. Pan, S. Kong, X. Zhang, G. Wang J. Electroanal. Chem., 727 (2014), pp. 154-162
- [20]. B. Sezer Tuncsoy, M. Tuncsoy, T. Gomes, V. Sousa, M.R. Teixeira, M.J. Bebianno, P. Ozalp Bull. Environ. Contam. Toxicol., 102 (2019), pp. 341-346
- [21]. P.I. Kyesmen, N. Nombona, M. Diale. ACS Omega, 6 (2021), pp. 33398-33408
- [22]. Y. Yang, D. Xu, Q. Wu, P. Diao. Sci. Rep., 6 (2016), pp. 1-13
- [23]. G. Avgouropoulos, T. Ioannides, C. Papadopoulou, J. Batista, S. Hocevar, H.K. Matralis Catal. Today, 75 (2002), pp. 157-167

- [24]. A.K. Singh, A. Pandey, P. Chakrabarti. IEEE Sensor. J., 21 (2021), pp. 5779-5786
- [25]. C.C. Hsu, Y.S. Lin, C.W. Cheng, W.C. Jhang. IEEE Trans. Electron. Dev., 67 (2020), pp. 976-983
- [26]. M. Patel, S. Mishra, R. Verma and D. Shikha, Discov. Mater., DOI:10.1007/s43939-022-00022-6
- [27]. S. Anandan, G.J. Lee, J.J. Wu Ultrason. Sonochem., 19 (2012), pp. 682-686
- [28]. Z. Zhang, P. Wang J. Mater. Chem., 22 (2012), pp. 2456-2464
- [29]. G. Sharma, A. Kumar, S. Sharma, M. Naushad, R. Prakash Dwivedi, Z.A. Alothman, G.T. Mola J. King Saud Univ. Sci., 31 (2019), pp. 257-269
- [30]. Kamalov S. et al. Antimicrobial activity enhancement and acute toxicity lowering of benzamide through preparation of metal complexes //Journal of Molecular Structure. – 2024. – T. 1303. – C. 137620.
- [31]. A. Parretta, M.K. Jayaraj, A. Di Nocera, S. Loreti, L. Quercia, A. Agati Phys. Status Solidi Appl. Res., 155 (1996), pp. 399-404
- [32]. L.S. Huang, S.G. Yang, T. Li, B.X. Gu, Y.W. Du, Y.N. Lu, S.Z. Shi J. Cryst. Growth, 260 (2004), pp. 130-135
- [33]. A. Roy, H.S. Jadhav, M. Cho, J.G. Seo J. Ind. Eng. Chem., 76 (2019), pp. 515-523
- [34]. B. Wang, X. Fu, S. Song, H. O. Chu, D. Gibson, C. Li, Y. Shi and Z. Wu, Coatings, DOI:10.3390/COATINGS8090325.
- [35]. S. Masudy-Panah, R. Siavash Moakhar, C.S. Chua, H.R. Tan, T.I. Wong, D. Chi, G.K. Dalapati ACS Appl. Mater. Interfaces, 8 (2016), pp. 1206-1213
- [36]. Kim, J.H. and Chung, K.W., Microstructure and properties of silicon nitride thin films deposited by reactive bias magnetron sputtering, J. Appl. Phys., 1998, vol. 83, no. 11, pp. 137–140]
- [37]. Al-Jenaby, A. Z., Ramizy, A., & Al-Samarai, A. M. E. (2021, February). Influence Different Substrates on the Sensing Performance of Copper Oxide Thin Films Synthesis via the Hydrothermal Method. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1095, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.

