



UDK: 57.022.023.577.11.12

O'tkir XOLIQOV,

Termiz muhandislik texnologiyalari instituti assisenti, fizika-matematika fanlari nomzodi

E-mail: v.arustamov@iplt.uz

Sherali XOJIYEV,

Toshkent davlat tibbiyot univesiteti dotsenti, fizika-matematika fanlari doktori

Isroil KOSIMOV,

Bioorganik kimyo instituti yetakchi muhandisi, PhD

Ilyos KHUDAYQULOV,

Ion plazmasi va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi, PhD

Boburjon KAXRAMONOV,

Ion plazmasi va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi, PhD

F.-m.f., PhD., k.i.x M. Adilov taqrizi asosida

Si/ZnO SIRTIDA MAGNETRONLI CHANGLATISH USULIDA QUYOSH ELEMENTI SIFATIDA YUPQA MIS OKSIDI QATLAMINI O'STIRISH VA TAVSIFLASH

Annotatsiya

Ushbu maqolada magnetron changlatish usuli orqali Si/ZnO taglik sirtida CuO va Cu₂O asosidagi yupqa qatlamli geterostrukturalar sintez qilindi. Tadqiqotda taglik sirtiga harorat va ionli tozalashning ta'siri o'rganildi. Uch xil holatda qizdirilmagan, 600 °C haroratda qizdirilgan va miltillama razryad ionlari bilan tozalangan CuO va Cu₂O qatlamlari o'stirildi. Hosil bo'lgan qatlamlarning kristallografik tuzilishi, fazaviy holati, sirt morfologiyasi, element tarkibi va Raman spektroskopik xossalari tegishli analitik usullar yordamida tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, yuqori haroratda qizdirish va ionli tozalash orqali bir jinsli, zich va kristallik darajasi yuqori bo'lgan qatlamlar hosil bo'ladi. Olingan CuO/Cu₂O geterostrukturalar quyosh elementlari yaratishda istiqbolli material sifatida tavsiya etiladi.

Kalit so'zlar: magnetron changlatish, geterostruktura, kristallik-amorflik, kristallitlar o'lchami, quyosh elementi, ruh oksidi.

ВЫРАЩИВАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА ТОНКОГО СЛОЯ ОКСИДА МЕДИ В КАЧЕСТВЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ Si/ZnO

Аннотация

В данной работе тонкопленочные гетероструктуры на основе CuO и Cu₂O были синтезированы на поверхности подложки Si/ZnO методом магнетронного распыления. В исследовании изучалось влияние температуры и ионной очистки на поверхность подложки. Слои CuO и Cu₂O выращивались в трех различных условиях: без нагрева, с нагревом до 600°C и с очисткой ионами импульсного разряда. Кристаллографическую структуру, фазовое состояние, морфологию поверхности, элементный состав и спектроскопические свойства комбинационного рассеяния света полученных слоев анализировали с использованием соответствующих аналитических методов. Результаты показали, что высокотемпературный нагрев и ионная очистка приводят к образованию однородных, плотных и высококристаллических слоев. Полученные гетероструктуры CuO/Cu₂O рекомендуются в качестве перспективных материалов для создания солнечных элементов.

Ключевые слова: магнетронное распыление, гетероструктура, кристалличность-аморфизм, размер кристаллитов, солнечный элемент, оксид спирта.

GROWTH AND CHARACTERIZATION OF A THIN COPPER OXIDE LAYER AS A SOLAR CELL USING THE MAGNETRON SPRAYING METHOD ON A Si/ZnO SURFACE

Annotation

In this paper, CuO and Cu₂O-based thin-film heterostructures were synthesized on a Si/ZnO substrate by magnetron sputtering. The effect of temperature and ion cleaning on the substrate surface was studied in the study. CuO and Cu₂O layers were grown in three different conditions: unheated, heated at 600°C, and cleaned with flash discharge ions. The crystallographic structure, phase state, surface morphology, elemental composition, and Raman spectroscopic properties of the resulting layers were analyzed using appropriate analytical methods. The results showed that high-temperature heating and ion cleaning produced homogeneous, dense, and highly crystalline layers. The resulting CuO/Cu₂O heterostructures are recommended as promising materials for creating solar cells.

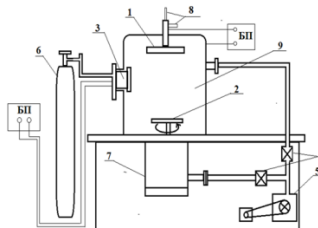
Key words: magnetron sputtering, heterostructure, crystallinity-amorphism, crystallite size, solar cell, spirit oxide.

Kirish. Hozirgi kunda energiyani olish, uni saqlash va samarali yetkazib berish dunyo miqyosida eng dolzarb muammolardan biri hisoblanadi. Bu boradagi ilmiy izlanishlar energiya hosil qiluvchi, saqlovchi va yetkazib beruvchi manbalarni arzon va samarali materiallar asosida ishlab chiqishga qaratilgan.

So'nggi bir necha o'n yilliklarda mis (Cu) yarimo'tkazgichlar texnologiyasida kontakt metall sifatida keng qo'llanib kelinmoqda. U avval qo'llanilgan alyuminiyning o'rnini bosuvchi material sifatida, shu bilan birga, yuqori haroratga bardoshli yarimo'tkazgichli qurilmalarning asosiy elementi sifatida ham muhim ahamiyat kasb etadi. Bundan tashqari, mis atomlari kremniy va germaniy kabi materiallarga nisbatan yuqori diffuziyanish qobiliyatiga ega [1]. Yarimo'tkazgichli mis oksidi (Cu_2O) quyosh batareyalari uchun istiqbolli materiallardan biri hisoblanadi. Cu_2O yuqori optik yutilish qobiliyati, yuqori barqarorlik, zaharli emasligi, ishlab chiqarishda Ni, Ag va Au kabi materiallarga nisbatan arzonligi, tabiatda keng tarqalganligi, hamda yuqori optik, elektr, magnit va katalitik xossalari tufayli muhim quyosh elementlari qatoriga kiradi [2–5]. Avvalroq magnetron changlatish usulida tayyorlangan CuO va Cu_2O yupqa plyonkalari bo'yicha tadqiqotlar amalga oshirilgan bo'lsa-da [6–10], biroq Si tayanchini 600°C haroratda qizdirib, miltillama razryad ionlari bilan tozalash orqali plyonka o'stirish bo'yicha tadqiqotlar ilk bor amalga oshirildi. Mis oksidi yupqa plyonkalarini olish uchun bir necha texnologiyalar — zol-gel, impulsli lazerli cho'kma, piroliz, kimyoviy bug'lanish va yuzada bir xillikka erishishda magnetronli changlatish usullari qo'llaniladi [11–15].

Ushbu tadqiqot ishida magnetron changlatish usuli orqali ZnO/Si tagligi 600°C haroratda qizdirib, miltillama razryad ionlari bilan tozalash orqali CuO/ZnO/Si va $\text{Cu}_2\text{O/ZnO/Si}$ geterostrukturalari hosil qilindi. Olingan geterostrukturalarning xossalari qizdirish va gamma nurlanish ta'sirida rentgen fazaviy tahlil, skanerlovchi elektron mikroskopiya va boshqa bir necha usullar orqali baholandi.

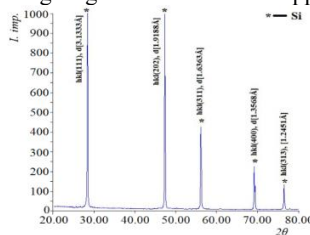
Tadqiqot metodologiyasi. Magnetron changlatish usulida o'stirilgan Cu_2O va ZnO geterostrukturalarining elektron xususiyatlariga qizdirishning ta'siri o'rganildi. Getra-birikmada ZnO p- tipli va Cu_2O n-tipli yarimo'tkazgich sifatida ishlatilgan. Yuzaning bir xilligiga hamda silliqligiga erishish uchun taglik Si ni 600°C haroratda qizdirish hamda miltillama razryad ionlari ta'sirida tozalashning optimal rejimi ishlab chiqildi. Namunalar o'zgarmas tok oqimida ishlaydigan magnetronli changlatish usulida katod elementi- Cu, Ar va O_2 (inert gaz) aralashmasi muhitida o'stirilgan 1-rasm.



1-rasm. Magnetron changlatish qurilmasining sxematik tuzilishi. 1- magnetron, 2- nishon, 3- ionizator, 4- elektromagnit klapan, 5- for nasos, 6- ballon, 7- diffuzion nasos, 8- sovitsish tizimi, 9- vakuum kamerasi.

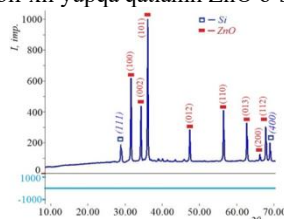
Tadqiqot ishimizda uch xil sharoitda katod elementi- Cu, Ar va O_2 (inert gaz) aralashmasi muhitida Si/ZnO taglikka CuO va Cu_2O yupqa qatlam magnetron changlatish yo'li bilan o'stirildi. Birinchi holda Si/ZnO taglikka hech qanday ta'sir qilmasdan to'g'ridan-to'g'ri, ikkinchi holda faqatgina taglik 600°C qizdirildi va uchinchi holatda esa Si/ZnO taglikni 600°C haroratda qizdirib miltillama razryad ionlari ta'sirida tozalab CuO va Cu_2O qatlamlari o'stirildi. Bu uch xil sharoitda o'stirilgan yupqa plyonkalarining rentgen struktura (rigaku) usuli yordamida kristallografik tuzilishi, rentgen faza tahlili yordamida esa kristall- amorflik darajalari, kristallitlar o'lchamlari, skanerlovchi elektron mikroskopda yuz emissiyasi, qatlam hosil bo'lganligi, Raman spektroskopiya usulida esa materialning tuzilishi va xususiyatlaridagi o'zgarishlari, elektrofizik va optik xususiyatlari aniqlandi.

Tahlillar va natijalar. Tadqiqot ishimizda bir qatlamli epitaksial strukturali KDB 0.5- 1bk 2(III) standart kremniy taglikdan foydalanilgan. Ushbu taglikning rentgen faza tahlili (2-rasm)da keltirilgan bo'lib, bunda difraksiya burchaklari $2\theta \approx 28.5^\circ, 48.2^\circ, 57.3^\circ, 69.8^\circ, 76.7^\circ$ larda tekisliklar aro masofasi-dhkl $\approx 3.13 \text{ \AA}, 1.91 \text{ \AA}, 1.63 \text{ \AA}, 1.35 \text{ \AA}, 1.24 \text{ \AA}$ ga teng ekanligi hamda Miller indeksleri-(hkl) 111, 202, 311, 400, 313 bo'yicha Si ga tegishli xarakterli cho'qqilar namoyon bo'lganligi kuzatildi.



2-rasm. Si taglik namunaning rentgen faza tahlili.

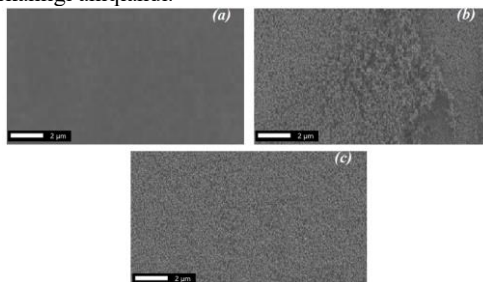
Bu natijalarlardan xulosa qilishimiz mumkinki Si taglik tarkibida qo'shimcha elementlar fazalari yo'qligi taglik namunasi sof (toza) ekanligidan dalolat beradi. Dastlab ushbu Si taglik 300°C haroratda qizdirilib, sirtiga magnetron changlatish usuli yordamida bir xil sharoitda 3ta bir xil yupqa qatlamli ZnO o'stirildi va rentgen faza tahlili qilindi (3-rasm).



3-rasm. Si taglik sirtiga magnetron changlatish usuli yordamida bir xil sharoitda o'stirilgan yupqa qatlamli ZnO plyonkaning rentgen faza tahlili.

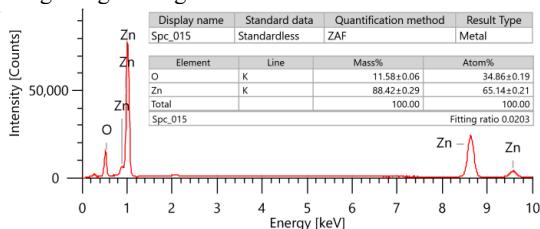
Rentgen faza tahlilidan 3-rasmda Si/ZnO namunada Si fazasining difraksiyasi burchaklari $2\theta \approx 28.5^\circ, 48.2^\circ$ bo'yicha tekisliklar aro masofasi -dhkl $\approx 3.13 \text{ \AA}, 1.36 \text{ \AA}$ ga, Miller indeksleri hkl $\approx (111), (400)$ ga teng ekanligi, ZnO fazasiga tegishli

difraksiyasi burchaklari $2\theta \approx 31.8^\circ, 34.4^\circ, 36.3^\circ, 47.5^\circ, 56.6^\circ, 62.8^\circ, 66.4^\circ, 68^\circ, 69.1^\circ, 77^\circ$ bo'yicha tekisliklar aro masofasi -dhkl $\approx 2.81 \text{ \AA}, 2.60 \text{ \AA}, 2.47 \text{ \AA}, 1.91 \text{ \AA}, 1.24 \text{ \AA}, 1.48 \text{ \AA}, 1.41 \text{ \AA}, 1.38 \text{ \AA}, 1.24 \text{ \AA}$ va Miller indeksleri mos ravishda hkl $\approx (100), (002), (101), (012), (110), (013), (200), (112), (202)$ ekanligi aniqlandi.



4-rasm. (a) Si taglik (b) 300 °C haroratda qizdirilgan (c) 600 °C haroratda qizdirilgan Si taglik sirtida o'stirilgan Si/ZnO ning mikroskopik tasviri.

4(abc) rasmda uch xil sharoitda qizdirilmagan, 300 °C va 600 °C haroratda qizdirilib ZnO qatlam o'stirilgan namunalarning SEM tasviri keltirilgan. Bunda Si taglikka ZnO yupqa qatlami 4-a rasm qizdirilmagan Si namunaga tegishli bo'lib yuza silliq va tekis tartiblangan, 4-b rasm 300 °C haroratda qizdirilib o'stirilgan ZnO ga tegishli bo'lib, SEM tasviridan yuzada ZnO nanozarrachalari betartib, hamda notekis joylashganligini ko'rishimiz mumkin. 4-c rasmda esa 600 °C haroratda qizdirilib o'stirilgan ZnO namunada yuza tartiblangan holda yaxshi adgeziyalarga, hamda zich sharsimon shaklda tuzilmalar namoyon bo'lgan. Bunda sirt bir xil o'lchamli taqsimotga ega bo'lgan sof tarkibdagi nanozarrachalar bilan to'liq qoplanganligini ko'rsatadi. Buning yana bir tasdig'i sifatida 5-rasmda EDS tahlilidan ZnO uchun sirtida ~O-35% Zn-65% atomlari joylashganligini hamda, massalari bo'yicha O- 11.6%, Zn-88.4% ga teng ekanligini ko'rishimiz mumkin.



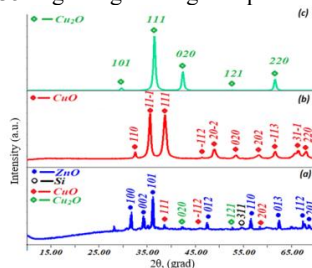
5-rasm. Si taglik sirtiga o'stirilgan ZnO yupqa plyonkaning EDS ma'lumoti.

Buni Si/ZnO strukturaning 6-a rasmda rentgen faza miqdori tahlilidan Zn-74.6%, O-18.2%, Si-7.2% ni tashkil etishi va 1-jadvaldagidek zarrachalar o'rtacha o'lchami Debye Scherrer formulasi yordamida hisoblanganida ~28-35 nm ga teng ekanligi aniqlangan. Demak taglikni dastlab 600 °C haroratda qizdirib magnetron changlatish usulida ZnO nano qatlam o'stirish maqsadga muvofiq hisoblanar ekan. Chunki bu rejimda taglik sirti tartiblangan, yaxshi adgeziyalangan, hamda zich sharsimon shaklda tuzilmalar paydo bo'lib sof tarkibli ZnO yupqa qatlam bilan to'liq qoplanar ekan.

Tadqiqot imizga qo'yilgan asosiy maqsad yuqorida tayyorlab olingan namuna Si/ZnO sirtida quyosh elementi sifatida yupqa Mis oksid qatlam o'stirish va ular asosida tadqiqot ishlarini amalga oshirishdan iborat. Ushbu qo'yilgan maqsadga erishish uchun quyidagi ishlar amalga oshirildi.

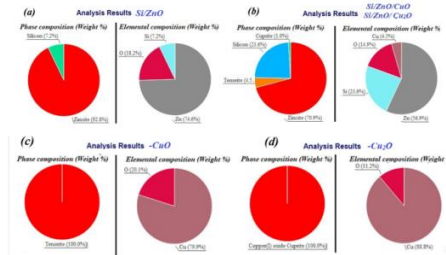
Si/ZnO namunaga uch xil sharoitda 6-rasmda (a)-qizdirilmagan, (b) 500 °C haroratda qizdirilgan va (c) 800 °C haroratda qizdirilib CuO va Cu₂O yupqa qatlamli plyonkalari o'stirildi. Rentgen faza tahlili yordamida CuO va Cu₂O namunalarning difraksiya burchaklari bo'yicha tekisliklar aro masofasi, miller indeksleri, kristall zarrachalari o'rtacha o'lchami, fazaviy miqdor va sifat tahlili, kristallik amorflik darajalari aniqlangan.

Si/ZnO plyonka sirtida qizdirmasdan CuO va Cu₂O yupqa qatlam o'stirilganda taglikka 6a-rasm sezilarli darajada kuchsiz bog'langan CuO va Cu₂O qatlam o'sganligi, yuzada ZnO cho'qqilari ko'plab kuzatiladi, 6b- rasmda Si/ZnO taglik 800 °C haroratda qizdirib o'stirilganda yuzada CuO namunaga tegishli difraksiya burchaklari $2\theta \approx 32.5^\circ, 35.5^\circ, 38.7^\circ, 48.8^\circ, 53.4^\circ, 58.2^\circ, 61.6^\circ$ larda, tekisliklar aro masofasi-dhkl $\approx 2.75 \text{ \AA}, 2.52 \text{ \AA}, 2.32 \text{ \AA}, 1.86 \text{ \AA}, 1.71 \text{ \AA}, 1.58 \text{ \AA}, 1.50 \text{ \AA}$ ga teng ekanligi kuzatiladi. Cu₂O namunada esa 6c rasmda rentgen difraksiya burchaklari $2\theta \approx 29.6^\circ, 36.2^\circ, 42.4^\circ, 52.6^\circ, 61.5^\circ, 69.8^\circ$, tekisliklar aro masofasi mos ravishda - dhkl $\approx 3.01 \text{ \AA}, 2.46 \text{ \AA}, 2.13 \text{ \AA}, 1.74 \text{ \AA}, 1.50 \text{ \AA}, 1.35 \text{ \AA}$ ga teng ekanligi aniqlandi.



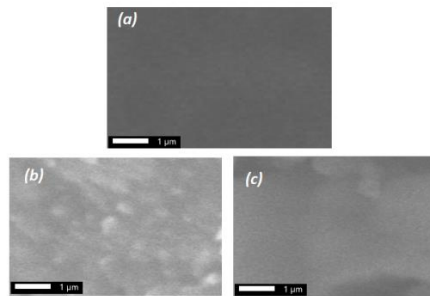
6-rasm. Si/ZnO sirtida (a)-qizdirmasdan (b) - 500 °C haroratda qizdirilgan (c) 800 °C haroratda qizdirilgan va miltillama razryad ionlari bilan tozalab o'stirilgan CuO va Cu₂O plyonkalarining rentgen faza tahlili keltirilgan.

Shu bilan bir qatorda CuO va Cu₂O ning amorf-kristallik fazalari, fazaviy miqdor va sifat tahlili 7-rasmda keltirilgan. Rentgen faza tahlilidan 7- rasmda (a) taglik Si /ZnO, (b) Si/ZnO taglik hrch qanday ta'sir bermasdan qizdirmasdan o'stirilgan CuO va Cu₂O plyonkaning, Si/ZnO taglik 800 °C haroratda qizdirib o'stirilgan (c) CuO va (d) Cu₂O yupqa plyonkalarining fazaviy miqdor va fazaviy sifat tahlili keltirilgan.



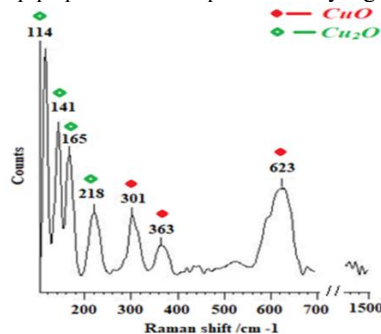
7-rasm-(a) Si/ZnO (b) Si/ZnO/CuO va Si/ZnO/Cu₂O (c) CuO (d) Cu₂O ning fazaviy miqdor tahlili.

Bundan ko‘rinib turibdiki taglikni qizdirmasdan CuO va Cu₂O o‘stirilganda (b) CuO va Cu₂O fazaviy miqdoridan Cu-4.5%, Si-23.6%, Zn-56.9% va O-esa 14.9% ni fazaviy sifat tahlilidan esa, CuO-1%, Cu₂O-4.55, ZnO-70.9% va Si-23.6% tashkil qilar ekan. Taglik 800 °C haroratda qizdirilib CuO va Cu₂O ostirilganida (c) CuO fazaviy miqdor tahlilidan Cu-79.9 va O-20.1% fazaviy sifat tahlilidan CuO- 100 % ni (d) Cu₂O ning fazaviy miqdor tahlilidan Cu-88.8%, O-11.2% ni hamda fazaviy sifat tahlilidan Cu₂O-100% ni tashkil qilishi aniqlangan. Bundan tashqari biz Si/ZnO sirtiga CuO va Cu₂O yupqa qatlam plyonkalarni o‘stirib, sirt morfologiyasini o‘rganildi.



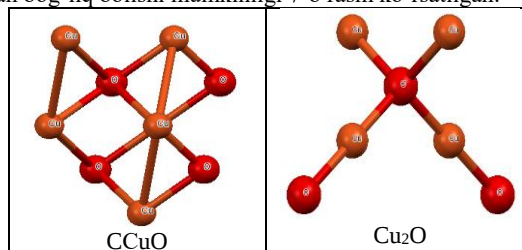
8-rasm. (a) taglik qizdirilmagan (b) taglik 500 °C haroratda qizdirilgan CuO o‘stirilgan (c) 800 °C haroratda qizdirilgan taglik miltillama razryad ionlari ta‘sirida tozalanib Cu₂O ostirilgan.

Biz Si/ZnO sirtiga CuO yupqa plyonkasini o‘stirganimizda hosil bo‘lgan kristallitlar o‘lchamligi 14 nm ni tashkil qildi. Bu ularning nano qatlam ko‘rinishida o‘stirilganligidan dalolat beradi biz namunani 500 °C va 600 °C haroratlarda qizdirib sirtga g‘adir budurliklar yo‘qolib asta sekin silliqanish yuzaga kelganligini, hamda Natijada 600 °C haroratgacha qizdirilgan namunada bir jinsli tartiblangan nanozararlardan iborat bo‘lgan yupqa qatlamni hosil qilish imkoniyatiga erishdik.



9-rasm. magnetron changlatish usulida Si/ZnO sirtiga o‘stirilgan mis oksidining raman spektri.

Raman spektr usulida olingan 9- rasmida spektrni tahlil qilganda 301, 363 va 623 sm⁻¹ chastotali tebranishlar bilan bog‘liq maksimalarga ega bo‘lgan uchta CuO ga tegishli, bundan tashqari, qizdirish ta‘sirida mikrostrukturadagi yoki fazaviy o‘tishlardagi o‘zgarishlar bilan bog‘liq 114, 141, 165 va 218 sm⁻¹ chastotali tebranishlarga mos Cu₂O ni xarakterlovchi cho‘qqilar namoyon bo‘lganligini alohida ta‘kidlash kerak. Ushbu chiziqlarning maksimal pozitsiyalari CuO uchun mos keladigan qiymatlarga mos keladi. Bu esa tadqiqot elementining kimyoviy tarkibi CuO ga mos ekanligidan dalolat beradi. Mis oksidini 800 °C haroratda qizdirilganda paydo bo‘lgan chiziqlar CuO va Cu₂O ning kristall tuzilishidagi o‘zgarishlar kristallik bilan bir qatorda amorf-kristallik tuzilmaning mavjudligi bilan bog‘liq bolishi mumkinligi 7-b rasm ko‘rsatilgan.



10-rasm. Si/ZnO sirtiga o‘stirilgan CuO va Cu₂O mis oksidi rentgen struktura tahlili.

O'stirilgan yupqa plyonkalar qatlami CuO va Cu₂O ning ma'lum bir qismi alohida olib rentgen struktura Rigaku Oksford difraksiyasi (XtaLAB Synergy-i) qurilmasi yordamida tekshirganimizda kristallografik tuzilishi, panjara parametrlari quyidagicha qiymatlarga ega bo'ldi: CuO uchun Monoclinic C 1 2/c1 a=4.6832Å, b=3.4288Å, c=5.1297Å struktura, Cu₂O uchun esa kubik P n-3m a=4.2580Å strukturaga ekinligi aniqlandi.

Xulosa va takliflar. Mazkur tadqiqotda magnetron changlatish usuli orqali Si/ZnO taglik asosida CuO va Cu₂O yupqa qatlamli geterostrukturalar hosil qilindi. Tajribalar uch xil holatda: qizdirilmagan, 600 °C da qizdirilgan, va 600–800 °C da qizdirilib, miltillama razryad ionlari bilan tozalangan tagliklarda olib borildi. Olingan qatlamlarning kristallik darajasi, fazaviy tarkibi, morfologiyasi, shuningdek elektrofizik va optik xususiyatlari chuqur o'rganildi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, ayniqsa yuqori haroratda qizdirish va ionli tozalash orqali hosil qilingan qatlamlarda kristallanish darajasi yuqori, struktura silliq va zich, fazaviy tarkibi esa sof holatda shakllangan. Cu₂O qatlamlarida 800 °C da tozalangan yuzaga o'stirilganda 100% kristall faza hosil bo'lgani qayd etildi. SEM va EDS tahlillari, shuningdek Raman spektroskopiyasi natijalari bu holatlarni tasdiqladi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, mos harorat va sirtga tayyorlov ishlovlari orqali mis oksidli yarimo'tkazgich qatlamlarning sifatini sezilarli darajada oshirish mumkin. Natijada tayyorlangan CuO/Cu₂O geterostrukturalar samarali va ekologik toza quyosh elementlarini yaratishda istiqbolli material sifatida taklif etilishi mumkin.

ADABIYOTLAR

1. Minami T, Nishi Y, Miyata T and Nomoto J 2011 Appl. Phys. Exp. 4 062301. DOI 10.1143/APEX.4.062301
2. Mittiga E, Salza E, Sarto F, Tucci M and Vasanthi R 2006 Appl. Phys. Lett. 88 163502. <https://doi.org/10.1063/1.2194315>
3. Izaki M, Shinagawa T, Mizuno K, Ida Y, Inaba M and Tasaka A T 2007 J. Phys. D 40 3326. DOI 10.1088/0022-3727/40/11/010
4. Jeong S S, Mittiga A, Salza E, Masci A and Passerini S 2008 Electrochim. Acta. 53 2226.
5. Izaki M, Mizuno K, Shinagawa T, Inaba M and Tasaka A 2006 J. Electrochem. Soc. 153 C668.
6. Teresa D G, Mark G S, Yanchun Z Rachel A V, Robert A V L and Jay A S 1996 Chem. Mater. 8 2499.
7. Nakaoka K and Ogura K 2002 J. Electrochem. Soc. 149 C579.
8. Fujimoto K, Oku T and Akiyama T 2011 J. Ceram. Soc. Jpn. 119 402.
9. Oku T, Noma T, Suzuki A, Kikuchi K and Kikuchi S 2010 J. Phys. Chem. Solids 71 551.
10. Oku T, Motoyoshi R, Fujimoto K, Akiyama T, Balachandran J and Cuya J 2011 J. Phys. Chem. Solids 72 1206.
11. Domnina M I, Filatov S K, Zyzyukia I I and Vergasova L P 1986 Neorgan. Materialy 22 1743.
12. Kidowaki H, Oku T and Akiyama T 2012 J. Phys. Conf. Series 352 012022.
13. Oku T, Takeda A, Nagata A, Fujimoto K, Akiyama T and Suzuki A 2012 J. Phys. Conf. Ser. 352 012024.
14. Oku T, Takeda A, Nagata A, Kidowaki H, Kumada K, Fujimoto K., Suzuki A, Akiyama T, Yamasaki Y, and Osawa E 2013 Mat. Tech. 28 21.
15. Martin A G, Keith E, David L K, Yoshihiro H and Wilhelm W 2006 Prog. Photovolt Res. Appl. 14 455.