

УДК 539.232

МРНТИ 29.19.16

<https://doi.org/10.47526/2022-2/2524-0080.03>

Б.Ж.СЕЙТОВ¹, А.Е.ҚАЗБЕК²

¹Phd докторы, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан, Түркістан қ., E-mail: bekbolat.seitov@ayu.edu.kz,

²магистрант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан, Түркістан қ., E-mail: aiymka1514@mail.ru

ГИДРОТЕРМАЛЬДЫ ӘДІСПЕН МЫРЫШ ОКСИДІНІҢ НАНОСТЕРЖЕНЬДЕРІН АЛУ

Аңдатпа. Мырыш оксиді (ZnO) жұқа пленкалары жұқа қабықшалы транзисторлар, күн батареялары, сенсорлар және оптоэлектрондық құрылғылар үшін өте перспективалы болып табылады. Мақалада гидротермальды синтез арқылы алынған мырыш оксидінің (ZnO) құрылымдық қасиеттері мен морфологиясы келтірілген. ZnO нанопленкалары (затравочный слой ретінде) ИТО шыны бетінде золь-гель әдіс арқылы тұндырылды. Тәжірибе нәтижелері золь-гельді айналдыру процесіндегі химиялық реагенттердің концентрациясы ZnO пленкаларының қасиеттеріне күшті әсер ететінін көрсетті. Нанопленка бетіне ZnO наностерженьдерінің үлгілері гидротермальды әдіспен, ерітіндінің температурасы шамамен 97°C-да 3 сағатта алынды. Синтезделген ZnO наностерженьдері күйдірілгеннен кейін электр кедергісі бірнеше есе өсті.

Наностерженьдердің алынған массивтерінің химиялық құрамы, морфологиясы сканерлеуші электронды микроскопия, рентгендік дифракция арқылы сипатталды. Зерттеу нәтижесінде ZnO наностерженьдерінің массивтері көрінетін жарыққа жоғары жақсартылған реакцияны көрсетті.

Мақаланың нәтижелерін металл оксидтерінің басқа комбинацияларында қолдануға болады, сонымен қатар күн энергиясын түрлендіруге арналған жоғары өнімді фотоэлектрхимия құрылғыларын одан әрі дамытудың көптеген қызықты мүмкіндіктерін ұсынады. Ғылыми зерттеулер нәтижелері баламалы энергетика үшін аса маңызды материалдық мәлімет болып табылады және мырыш оксиді арқылы суды ыдырату жүйелері фотоанодының белсенді қабаттарын қалыптастыру сутегі отынын генерациялаудың фотоэлектрхимиялық жүйелерін жасауда сала мамандарымен қолданылуы мүмкін.

Кілт сөздер: золь-гель, гидротермальды әдіс, фотоанод, нанопленка, мырыш оксиді, жартылай өткізгіш, наностержень.

Б.Ж.СЕЙТОВ¹, А.Е.ҚАЗБЕК²

¹Phd доктор, старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, (Казахстан, г. Туркестан), E-mail: bekbolat.seitov@ayu.edu.kz ,

²магистрант, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, (Казахстан, г. Туркестан), E-mail: aiymka1514@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. Тонкие пленки оксида цинка (ZnO) являются очень перспективными для тонкопленочных транзисторов, солнечных батарей, датчиков и оптоэлектронных устройств. В статье приведены структурные свойства и морфология оксида цинка (ZnO), полученного гидротермальным синтезом. Нанопленки ZnO (как затравочный слой) осаждались методом золь-геля на стеклянной поверхности ИТО. Результаты эксперимента показали, что концентрация химических реагентов в процессе превращения золь-геля оказывает сильное влияние на свойства пленок ZnO. Образцы наностержней ZnO на поверхности нанопленки получали гидротермальным методом при температуре раствора около 97°C в течение 3 часов. После обжига синтезированных наностержней ZnO электрическое сопротивление увеличилось в несколько раз.

Химический состав, морфология полученных массивов наностержней характеризовались сканирующей электронной микроскопией, рентгеновской дифракцией. В результате исследования массивы наночастиц ZnO показали высоко улучшенную реакцию на видимый свет.

Результаты статьи могут быть использованы в других комбинациях оксидов металлов, а также предлагают множество интересных возможностей для дальнейшей разработки высокопроизводительных фотоэлектрохимических устройств для преобразования солнечной энергии. Результаты научных исследований являются важнейшими материальными данными для альтернативной энергетики и могут быть использованы специалистами отрасли в создании фотоэлектрохимических систем генерации водородного топлива с образованием активных слоев фотанода систем разложения воды оксидом цинка.

Ключевые слова: золь-гель, гидротермальный метод, фотанод, нанопленка, оксид цинка, полупроводник, наностержень.

B.ZH. SEITOV¹, A.E. KAZBEK²

¹Phd, Senior Lecturer, the International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi (Kazakhstan, Turkestan), E-mail: bekbolat.seitov@ayu.edu.kz,

²Master's student, International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Master's (Kazakhstan, Turkestan), E-mail: aiymka1514@mail.ru

OBTAINING ZINC OXIDE NANORODS BY HYDROTHERMAL METHOD

Abstract. Thin films of zinc oxide (ZnO) are very promising for thin-film transistors, solar panels, sensors and optoelectronic devices. The article presents the structural properties and morphology of zinc oxide (ZnO) obtained by hydrothermal synthesis. ZnO nanofilms (as a seed layer) were deposited by the sol-gel method on the glass surface of STO. The results of the experiment showed that the concentration of chemical reagents in the process of sol-gel

transformation has a strong effect on the properties of ZnO films. Samples of ZnO nanorods on the surface of the nanofilm were obtained by hydrothermal method at a solution temperature of about 97 ° C for 3 hours. After firing the synthesized ZnO nanorods, the electrical resistance increased several times.

The chemical composition and morphology of the obtained nanorods arrays were characterized by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. As a result of the study, arrays of ZnO nanoparticles showed a highly improved response to visible light.

The results of the article can be used in other combinations of metal oxides, and also offer many interesting opportunities for further development of high-performance photoelectrochemical devices for solar energy conversion. The results of scientific research are the most important material data for alternative energy and can be used by industry specialists in the creation of photoelectrochemical systems for generating hydrogen fuel with the formation of active photanode layers of water decomposition systems with zinc oxide.

Keywords: sol-gel, hydrothermal method, photanode, nanofilm, zinc oxide, semiconductor, nanorods.

Кіріспе

Бүгінгі таңда көптеген зерттеулер қоршаған ортаға аз әсер ететін сутегі алудың арзан және тиімді әдістерге бағытталған. Сутегін алудың ең қолайлы әдісі жүйенің әртүрлі ішкі және сыртқы сипаттамаларына байланысты, өйткені әрбір әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Сонымен қатар, күн энергиясы қоршаған ортаға, гидроэнергетикаға (су экожүйесіне зиян), жел қуатына (жануарлар әлеміне зиян), биомассаға (биологиялық әртүрлілікті жоғалтуға әкелуі мүмкін) зиян келтірмейді. Ең кең таралған және таза энергия көзі – күн энергиясы [1-3]. Күн энергиясын түрлендіруге және сутегі өндірісі, күн батареялары, фотоэлектрлік қондырғылар сияқты көптеген технологиялық салаларда пайдалануға болады [2-5]. Фотоэлектрхимиялық суды бөлу сутегін алудың ең тиімді және экологиялық таза әдістерінің бірі болып табылады [4-7].

Мырыш оксиді (ZnO) - бөлме температурасында 60 мэВ және қозу энергиясы 3,37 эВ болатын II-VI тобының жартылай өткізгіш материалы [6]. Бір өлшемді нанокұрылымдар және екі өлшемді нанокұрылымдар сияқты әртүрлі ZnO нанокұрылымдар жасау соңғы екі онжылдықта кеңінен зерттелді [8-9]. Бір өлшемді (1D) наноматериалдар функционалды нанокұрылымдардың негізі болып саналады [10]. Соңғы жылдары наногенератор [11], нанолазер [12], сенсор [13], өрістік транзисторлар (өріс әсерлі транзисторлар) [14] және жарық шығаратын диодтар сияқты 1D наноматериалдарға негізделген нанокұрылымдар сәтті жасалды [15,16]. Соңғы уақытта бір өлшемді нанокұрылымдарды екі және үш өлшемді (2D және 3D) нанокұрылымдарға иерархиялық жинақтауға көп күш жұмсалды. Әдебиеттерде нанокөмбінаттар [17], дендритті наноөткізгіштер [18], наносымдар және нанопарақтар [19] сияқты 2D және 3D наноматериалдарды дайындау туралы айтылды. 2D және 3D наноматериалдардың жаңа архитектуралары олардың бірегей қасиеттерін анықтайды, бұл 2D және 3D наноматериалдар жаңа функционалды материалдарды жүзеге асыруда және нанотехнологиядағы одан әрі қосымшаларды жүзеге асыруда маңызды рөл атқара алатынын көрсетеді.

Гидротермальды әдіс органикалық түзеткіштерді немесе өнімді қосымша өңдеуді (ұнтақтау және кальцийлеу) қажет етпейді, бұл оны қарапайым және экологиялық таза әдіс етеді. Синтез автоклавта жүреді, онда қоспасы біртіндеп 100-300°C температураға дейін қызады және бірнеше күнге қалдырылады. Қыздырудан кейін салқындатудан кейін кристалл бөлшектері пайда болады, содан кейін олар өседі. Бұл әдіс көптеген артықшылықтарға ие, оның ішінде төмен температурада синтездеу мүмкіндігі бар, бастапқы қоспаның құрамына және процестің температурасы мен қысымына байланысты кристалдардың әртүрлі формалары мен өлшемдерін алуға болады, жоғары кристалдану және жоғары тазалық

дәрежесі бар [20]. Көбінесе практикалық қолдануға арналған наностерженьдер мырыш оксиді массивтері жасанды сапфир немесе кремний сияқты монокристалды субстраттарда өсіріледі, бірақ мұндай субстраттардың құны жоғары. Кварц, шыны және т.б. сияқты аморфты субстраттар едәуір жоғары коммерциялық әлеуетке ие, алдын-ала субстраттың бетіне наностерженьдерге -темір мырыш оксидінің реттелген массивін синтездеу кезінде каталикалық қабат жасалады, ол үшін алтын, күміс және палладий қолданылады, сонымен қатар темір және мыс қолданылады. Алайда, материалдардың осы класын кеңінен қолдану қарапайым, тиімді және арзан синтез әдістерін жасауды қажет етеді.

Ұзын наностерженьдерді алудың маңызы зор, бояғыштарда, күн батареяларында ZnO қолдану тиімділігі ZnO наностерженьдердің ұзындығына қарай артады. Наностерженьдердің ұзындығын ұлғайту үшін C₂H₅N полиэтиленаминді (PEI) қолдану ұсынылады. Сулы ерітіндідегі ZnO нанодтарының синтезіндегі полиэтиленаминнің рөлі алғаш рет [21] еңбектегінде зерттелген. Дұрыс таңдалған PEI концентрациясы гидротермальды синтез арқылы алынған ZnO наностерженьдердің ұзындығын едәуір ұлғайтуға мүмкіндік беретіні және ZnO-ның шыны бетіне емес, негізгі қабатпен артықшылықты өсуіне ықпал ететіні көрсетілді.

Зерттеу жұмыстың мақсаты гидротермальды әдіспен синтезделген ZnO қабатының өзгеру процесіне, құрылымына, фазалық құрамына және физико-химиялық параметрлеріне синтездеу шарттарының әсерін кешенді зерттеу.

Алға қойылған мақсатқа жетуде келесі міндеттер қойылды:

1. Өз тәжірибелік мәліметтермен қоса әлемдік әдебиеттердің тәжірибелік мәліметтер жүйесін қолдана отырып, жартылай өткізгіш материалдар негізіндегі электрохимия процестерін теориялық зерттеу;

2. Қажетті қасиеттері бар мырыш оксиді негізінде нанобөлшектерді синтездеу режимдерін жасау;

3. Біртекті 1D және 2D массивтерін қалыптастыру үшін ZnO құрылымдарының гидротермиялық синтезінің режимдерін жасау.

2. ӘДІСТЕМЕЛІК БӨЛІМ

Зерттеу жұмысында мына әдістер қолданылды: золь-гель, гидротермальды әдіс.

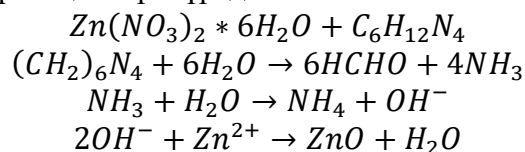
2.1 Золь-гель әдісімен ZnO жұқа плёнкасын алу

ZnO – ның біркелкі жұқа қабаттары золь-гель әдісімен шыны бетіне орналастырылды. Барлық индий-қалайы оксидті (ITO) шынылар этанолда және құрамында дистилденген су (50 мл), сутегі асқын тотығы H₂O₂ (12.5 мл) және аммоний NH₄OH (25%, 12.5 мл) бар ерітіндіде алдын-ала мұқият тазаланды. Золь әдісімен 0,4 мг цинк ацетатына Zn C₄H₆O₄ (99,99%, Sigma-Aldrich) 10 мл этанолды C₂H₅OH (90%) қосып бөлме температурасында магнитті араластырғышта ерітіп дайындап алынды. Мырыш ацетаты жоғары концентрацияда үлкен бөлшектердің түзілуіне байланысты ерітінді бұлыңғыр болды. Бұл жағдайда ерітіндідегі агрегация процесін болдырмайтын C₃H₆O₃ сүт қышқылының бірнеше тамшысын қосу арқылы мөлдір ерітінді алынды. Содан кейін ерітінді шыны бетіне жағылды. Шыны бетінде ерітінді біркелкі таралу үшін горизонтальда столда 1500-1600 айн/мин 1 минуттан бірнеше рет орындалды. Осыдан кейін шыны кептіру шкафына салынып, 30 минут бойы 152°C температурада ұсталды. Күйдіруді 450°C температурада муфельді пеште 60 минутта орындалып, шыны бетінде біркелкі ZnO қабатының пайда болуына әкелді. Қалың пленкаларды алу үшін процесс қажетті рет қайталанады.

Бұл әдіспен алынған жұқа пленканы гидротермальды әдіспен мырыш оксидінің наностерженьдерін алу үшін негізгі қабат (затравочный слой) ретінде қолдануға болады.

2.2 Гидротермальды әдіспен ZnO наностерженьдерін синтездеу

ZnO наностерженьдерінің гидротермальды синтезінде реакция прекурсорлар ретінде Zn иондары гексаметилентетрамин мен мырыш нитраты бар ерітіндіде жүреді. Zn мен НМТА арасында келесі химиялық реакциялар жүреді:



Гидротермальды синтез кезінде гидроксид иондары НМТА-ның ыдырауы арқылы түзіледі, содан кейін ZnO-мен әрекеттеседі, осылайша шыны бетіне ZnO наностерженьдерін түзеді.

Мырыш нитраты $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (99.99% %, Sigma-Aldrich) мен гексаметилентетраминнің $C_6H_{12}N_4$ сулы ерітінділерінің қоспасында ZnO наностерженьдерінің гидротермальды синтезі жүргізілді. Мырыш нитратының және гексаметилентетраминнің типтік концентрациясы сәйкесінше 0,1 М алынды. Қажетті концентрация алуда әр қоспа жеке 100 мл дистилдинген суда ерітілді. Екі компонент магниттік араластырғышта 10 минут бойы үздіксіз араластырылды. 10 мин өткеннен кейін екі қоспаны бірге қосып магнитті арластырғышта ерітіліп дайындалды. Қоспа дайындалған ыдысқа шыныларды салып пленкамен қаптап 97° С температурада 3 сағ қайнатылды. Дайын болған стекло 450° С температурада 90 минут муфельді пеште күйдірілді.

ZnO наностерженьдерінің гидротермальды синтезі төмен температура техникасы [22] бойынша жүргізілді. Синтез ыстыққа төзімді стаканда жүргізілді. Негізгі қабаты бар шынылар ыстыққа төзімді жабысқақ таспамен ұстатылып, тігінен орналастырылған, жоғарғы беті стаканның ортасында орналасқан. Дайындалған ерітіндісі мен үлгілері бар стакан герметикалық қақпақпен жабылған алдын ала белгіленген температураға дейін дайындалған ваннаға орналастырылған. Стакан қыздырылған магниттік араластырғышқа қойылды. Синтез процесінің ұзақтығы 3 сағатты құрады. Синтез аяқталғаннан кейін үлгілер алынып, дистилденген сумен жуылды. Нәтижесінде гидротермальды әдіспен ІТО шыныларда тік бағытталған мырыш оксидінің наностерженьдеріаношоғырлары синтезделді.

Күн батареялары мен әртүрлі типтегі датчиктер жасау үшін әдебиетте перспективалы болып саналатын ZnO наностерженьдерінің массивтерін тек негізгі қабаты бар шыныларда алуға болады.

Гидротермальды синтездің артықшылықтарына төмен шығындар, репродуктивтілік, синтезделген материалдардың қасиеттерін температура, ұзақтық және өсу ерітіндісінің компоненттерінің концентрациясы сияқты параметрлерді өзгерту арқылы басқару мүмкіндігі жатады.

2.3 ZnO наножабынының сипаттамасы

Жұқа наножабынның беткі морфологиясы жұмыс кернеуі 30 кВ болатын JEOL JSM-6490 LA (SEM) сканерлеуші электронды микроскоптың көмегімен зерттелді. Дайындалған ZnO құрылымдық қасиеттерін зерттеу үшін 10–80 диапазонында CuK ($\lambda = 0,154$ нм) сәулеленуімен рентгендік дифрактометрмен (XRD, Xpert PRO PANalytical, Германия) пайдаланылды.

3.НӘТИЖЕЛЕР, ТАЛДАУ ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

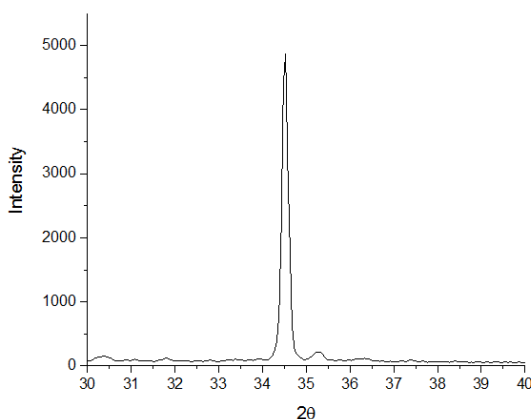
Ғылыми зерттеу барысында жартылай өткізгіш материалдарды қалыптастырудың тәжірибелік процедуралары жүргізілді. Қазіргі уақытта метал оксидінің жартылай өткізгіш пленкалары матрица және жаңа буын күн батареяларында электрлік тасымалдау материалы ретінде кеңінен қолданылады. Мырыш оксиді - мұндай аккумуляторларға ең қажетті материалдардың бірі. Бұл тікелей саңылаулардың энергетикалық құрылымымен, үлкен өткізгіштікпен, n-типті өткізгіштікпен және әр түрлі морфологиялы нанокристалдардың әр алуан түрлілігімен ерекшеленеді. Сонымен қатар, ZnO монокристалдарындағы

электрондардың қозғалғыштығы басқа металл оксидінің TiO_2 жартылай өткізгішінен гөрі өзгеше болып табылады. Фотоанодтық материалдар ретінде үлкен беткейлік және бірнеше интерфейстері бар иерархиялық гетерокұрылымдар күн энергиясын тиімді пайдалану үшін суды фотоэлектрохимиялық ыдыратуға үлкен мүмкіндік береді. Кристалл торының параметрлері ұқсас басқа n-типті жартылай өткізгіштерде n-типті мырыш оксидінің эпитаксиалды өсуі арқылы алынатын мырыш оксидіне негізделген гетероструктуралар мен p-n гетероқосылыстардың да болашағы зор.

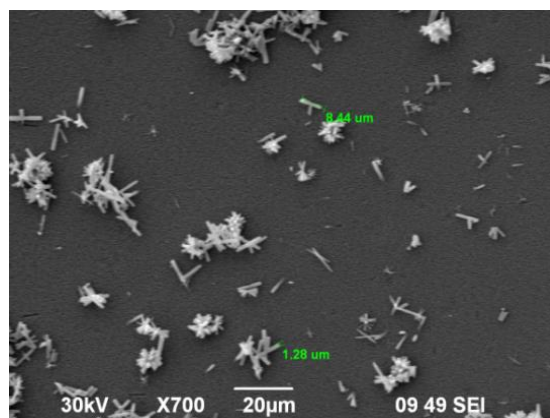
Тыйым салынған аймағы бар жартылай өткізгіш ZnO фотоэлектрохимиялық ыдырауында фотоанод ретінде қолданылған кезде әртүрлі артықшылықтарға ие, мысалы, қолайлы аймақтық құрылым, жоғары электронды қозғалғыштық, экологиялық таза, жұқа беттік құрылым және TiO_2 -ге қарағанда әртүрлі фотокаталитикалық реакциялар үшін салыстырмалы тиімді болып табылады, дегенмен, кең тыйым салынған аймаққа байланысты ZnO көрінетін жарыққа салыстырмалы түрде төмен жауап береді.

Сурет 2-де алтыбұрышты құрылымды мырыш оксидінің СЭМ кескіні көрсетілген. Суретте көрсетілгендей мырыш оксидінің наностерженьдері біркелкі тегіс қабат болып орналасқан. ZnO наностерженінің ұзындығы шамамен 8,44 нм, ал орташа қалыңдығы 1,28 нм құрайды. Дифракциялық пик ZnO нақты эксперимент кезінде сәтті алынғанын көрсетті.

Шыны субстраттарда өсірілген ZnO пленкаларының XRD үлгілерінің суреттері, спектрлер барлық пленкалардың 34-тен 35-ке дейінгі бір ғана шыңы бар екенін көрсетеді.



Сурет – 1. Мырыш оксиді наностерженьдерінің рентгендік дифракциялық спектрі



Сурет – 2. 97°C - да 3сағатта алынған наностерженьдерінің СЭМ кескіндері

ҚОРЫТЫНДЫ

Мақалада гидротермальды әдіспен мырыш оксиді наностерженьдерінің нәтижелері көрсетілген. Синтезделген золь-гельді айналдыруымен алынған ZnO пленкалары алтыбұрышты вюрцит кристалды құрылымы бар екенінін және жоғары кристалдылықты көрсетті. Мырыш оксидінің наностерженьдері сулы ерітіндіде гидротермальды әдіспен әртүрлі химиялық заттардың қатысуымен төмен температурада алынды. Процесс барысында $Zn(OH)_2$ тұнбасы пайда болады, ол қызған кезде ZnO кристалдарына тікелей ыдырайды. Алынған наностерженьдер SEM, XRD әдістерімен зерттелді. Ерітіндінің концентрациясын өзгерту арқылы ZnO үлгілерінің морфологиясын басқаруға болатындығын анықталыңды.

Қорытындылай келе, төмен температурадағы гидротермальды әдіс біртекті ZnO наностерженьдер алудың жақсы және экологиялық таза әдісі. Мұндағы жоғары кристалдылығы бар ZnO қабықшалары жұқа пленкалы сенсорлар, транзисторлар және күн батареялары үшін өте перспективалы болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. Huang, J.; Yin, Z.; Zheng, Q. Applications of ZnO in organic and hybrid solar cells. // *Energy Environ. Sci.* – 2011. - Vol. 4. – P. 3861– 3877.
2. Ong C. B et al. A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications *Renewable and Sustainable*. // *Energy Reviews.* – 2018. - Vol. 81.- P. 536–51
3. Van de Krol and M. Grätzel. Photoelectrochemical hydrogen production *Electronic materials: science & technology.* // New York: Springer. – 2010. - P. 321
4. Mufti N. et al. Synthesis and photocatalytic properties of Fe₃O₄@TiO₂ core-shell for degradation of Rhodamine B. // *American Institute of Physics.* - 2016. – Vol. 1712 - P. 050009 <https://doi.org/10.1063/1.4941892>
5. Acar C and Dincer I. Analysis and assessment of a continuous-type hybrid photoelectrochemical system for hydrogen production.// *International Journal of Hydrogen Energy.* – 2014. - Vol. 39. – P. 15362–72
6. Ozgur U. et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. // *Journal of Applied Physics.*- 2005. - Vol. 98. – P. 041301-1-103
7. Kudo, A. and Miseki, Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. // *Chemical Society Review.* – 2009. - Vol. 38. - P. 253-278 <https://doi.org/10.1039/B800489G>
8. Sheng Xu and Zhong Lin Wang. One-dimensional ZnO nanostructures: Solution growth and functional properties.// *Nano Research.* – 2011. - Vol. 4. - P. 1013-1098
9. Ahmad M., Zhu J. ZnO based advanced functional nanostructures: synthesis, properties and applications.// *Journal of Materials chemistry.* – 2011. - Vol. 21. -№3. - P. 599-614
10. J.T.Hu, T.W. Odom, C.M. Lieber. Chemistry and physics in one dimension: synthesis and properties of nanowires and nanotubes.// *Accounts of Chemical Research.* - 1999.- Vol. 32. - №5. – P. 435-445.
11. Wang, Z.L. and Song, J.H. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays.// *Science.* - 2006. - Vol.312. - P. 242-246
12. Oulton R. F. et al. Plasmon lasers at deep subwavelength scale.// *Nature.* – 2009. - Vol.461. - №7264. – P.629-632
13. Cui Y. et al. Functional Nanoscale Electronic Devices Assembled Using Silicon Nanowire Building Blocks.// *Science.* – 2001. – Vol. 293. – P. 1289-1292
14. Duan X.F. et al. Indium phosphide nanowires as building blocks for nanoscale electronic and optoelectronic devices. // *Nature.* – 2001. – Vol.409. – P. 66–69.

15. Huang Y. et al. Nanowires for integrated multicolor nanophotonics. //Small . – 2005. – Vol. 1.– №1. – P. 142-7
16. Liu C. et al. Schottky junction photovoltaic devices based on CdS single nanobelts.// The Journal of Physical Chemistry C.– 2009. – P. 11314478.
17. Wang Z.L. et al. Induced Growth of Asymmetric Nanocantilever Arrays on Polar Surfaces.// Physical Review Letters. – 2003. – Vol. 91.– P. 185502.
18. Haoquan Y. et al. Dendritic Nanowire Ultraviolet Laser Array. // Chemical Society Reviews journal. – 2003.– Vol. 125. – P. 4728-4729
19. Shen G. et al. Growth of Self-Organized Hierarchical ZnO Nanoarchitectures by a Simple In/In₂S₃ Controlled Thermal Evaporation Process. // The Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Vol. 109. – №21.– P.10779–10785
20. Ismail A.A. et al. Application of statistical design to optimize the preparation of ZnO nanoparticles via hydrothermal technique.// Materials Letters. – 2005. – Vol. 59 – №14-15.– P. 1924-1928.
21. Qiu, J. et al. Solution-derived 40 μm vertically aligned ZnO nanowire arrays as photoelectrodes in dye-sensitized solar cells.// Nanotechnology. – 2010. – Vol. 21 – №19. – P.195602
22. Hu X. et al. Effects of polyethylenimine on morphology and property of ZnO films grown in aqueous solutions. // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255. – №15. – P. 6823–6826
[DOI: 10.1016/j.apsusc.2009.02.091](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.02.091)