

Металл бірлескен катализаторларын жартылайөткізгішке селективті фотоқондыру арқылы CO₂-нің фотокаталитикалық тотықсыздануын арттыру

А.Ғ. Баратов^{1,2}, Ұ.Ә. Әбдікәрімова^{1,2}, Д.А. Утарова²,
А. Сайлаубек², Ч.Б. Даулбаев², Ж.Б. Құспанов^{2*}

¹Satbayev University, Сатпаева к., 22, Алматы, Қазақстан

²Ядролық физика институты, Ибрагимова к., 1, Алматы, Қазақстан

ARTICLE INFO

Алынған
19.02.2026

Түзетілген түрде алынды
13.05.2026

Қабылданды
01.06.2026

Түйін сөздер:

фотокатализ; CO₂ тотықсыздануы;
ASTO фотокатализаторы;
селективті фотоқондыру;
көпкомпонентті бірлескен
катализатор

АҢДАТПА

Бұл зерттеу жұмысында тотықсыздандырғыш және тотықтырғыш бірлескен катализаторлармен (Ag, Ni және Co) модификацияланған Al-легіріленген SrTiO₃ (ASTO) материалының жеке-дара селективті фотоқондыру әдісі арқылы зарядтардың тиімді бөлінуін және CO₂-нің айқындалған активациясын қамтамасыз ететіні қарастырылды. Фотокаталитикалық сынақтар нәтижесі Ag/ASTO/Co үлгісі үшін негізгі өнім CO екенін көрсетті, оның шығымы 1,61 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹ және селективтілігі 63,4% болды. Ал Ni-ді Ag/ASTO/Co жүйесіне енгізу CO шығымын 9 еседен астам арттырып (15,2 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹ дейін), селективтілігін 79,9%-ға дейін жоғарылатты, бұл ретте H₂ бөлінуі мен CH₄ түзілу реакциялары басеңдетілді. Алынған нәтижелер Ag, Ni және Co арасындағы синергетикалық әсерді көрсетіп, қосымша реагенттерді қолданбай-ақ су ортасында CO₂-ні тотықсыздануына арналған селективті әрі тиімді фотокатализаторларды жасаудың ұтымды жоспарын ұсынады.

Қысқартылған сөздер

CO ₂	Көмірқышқыл газы
ASTO	Al-мен легіріленген SrTiO ₃

1. Кіріспе

Күн энергиясын пайдалану арқылы көмірқышқыл газын (CO₂) құны жоғары өнімдерге дейін фотокаталитикалық тотықсыздандыру қазба отындарын қарқынды қолданудан туындайтын жаһандық жылыну салдарын азайтудың әлеуетті тәсілі ретінде қарастырылады [1-3]. Соңғы жылдары бұл бағыт әртүрлі фотокатализаторлар кластарын, соның ішінде металл оксидтерін, сульфидтерді, нитридтерді, оксинитридтерді және перовскит материалдарды қолдану арқылы белсенді зерттелуде. Олардың ішінде перовскит құрылымды металл оксидтері жоғары химиялық тұрақтылығы, басқарылатын электрондық құрылымы және энергетикалық зоналардың қолайлы орналасуы арқасында ерекше қызығушылық тудырады [4]. Атап айтқанда, SrTiO₃

CO₂-ні тотықсыздандыруға арналған әлеуетті фотокатализатор ретінде саналса да, оның тәжірибеде қолданылуы кең тыйым салынған аймақпен (~3,2 эВ) шектеледі [5], бұл негізінен ультракүлгін аймақта ғана белсенділік көрсетуіне, сондай-ақ заряд тасымалдаушылардың жоғары рекомбинация жылдамдығына әкеледі. Күшейген рекомбинация жоғары температуралы синтез барысында түзілетін оттегі вакансиялары мен Ti³⁺ орталықтарының пайда болуымен байланысты, олар фотогенерацияланған электрон-кемтік жұптарының рекомбинация орталықтары ретінде әрекет етеді.

Аталған шектеулерді еңсерудің тиімді тәсілдерінің бірі – перовскит оксидтерін кристалдық торға легірлеуші элементтер енгізу арқылы модификациялау. Бұл материалдың оптикалық және электрондық қасиеттерін, соның ішінде жарық жұтуын, заряд тасымалдаушылардың концентрациясы мен бөлінуін, сондай-ақ бөлшектер морфологиясын мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік береді [6, 7]. SrTiO₃ материалын алюминиймен легірлеу фотокаталитикалық белсенділікті едәуір арттыратыны көрсетілген: Al-дың оңтайлы мөл-

*Corresponding author: Zh.B. Kuspanov; E-mail address: zhenis.kuspanov@gmail.com

шері беткі оттегі вакансияларының және бақыланатын Ti^{3+} күйлерінің түзілуіне немесе азаюына ықпал етіп, фотогенерацияланған заряд тасымалдаушылардың тиімді бөлінуін қамтамасыз етеді әрі олардың рекомбинациясын тежейді [8].

$SrTiO_3$ фотокатализаторының тиімділігін одан әрі арттырудың тағы бір жолы – оның бетін бірлескен катализаторлармен модификациялау [9]. Металл және оксидтік бірлескен катализаторлар фотокатализатор бетінде белсенді орталықтар түзіп, фотогенерацияланған зарядтардың бөлінуін жеңілдетеді, нәтижесінде фотокаталитикалық белсенділік артады. Кеңінен зерттелген бірлескен катализаторларға асыл металдар (P , P_d , Au және Ag) [10–12] және CoO_x [13, 14] тәрізді өтпелі метал оксидтері жатады. Соңғы уақытта никель негізіндегі бірлескен катализаторлар фотокатализдегі асыл металдардың ең перспективалы баламасы ретінде қарастырылуда. Олардың экономикалық тиімділігі мен жоғары өнімділігінің үйлесуі зарядтардың тиімді бөлінуі есебінен CO_2 тотықсыздану реакцияларында тамаша нәтижелер көрсететін NiO және Ni_2P сияқты жүйелерді жасап шығаруға мүмкіндік берді [15, 16]. Селективті фотоқондыру әдісі бірлескен катализаторларды бағытталған түрде орналастыруға мүмкіндік береді: металдар электрондар жиналатын аймақтарға, ал оксидтер кемтіктер жиналатын аймақтарға қонады. Мұндай селективті локализация Шоттки тосқауылдары [17] немесе р–п ауысулары арқылы фотогенерацияланған зарядтардың қозғалу жолдарымен сәйкес келіп [18], заряд тасымалдаушылардың бөлінуін күшейтеді және кванттық тиімділікті арттырады.

Осы жұмыста күн сәулесінің иммитаторы ксенон шамымен сәулелендірілген, Al -мен легірілген $SrTiO_3$ фотокатализаторы бетіне селективті түрде қондырылған Ag , Ni және Co бірлескен катализаторларының CO_2 -ні құны жоғары өнімдерге дейін фотокаталитикалық тотықсыздандырудағы синергетикалық әсері мен селективтілігі зерттеледі.

2. Эксперименттік бөлім

2.1. Материалдар

Титан(IV) диоксиді, анатаз (TiO_2 , бөлшектер <25 нм, 99,7%) (Sigma-Aldrich), стронций нитраты ($Sr(NO_3)_2$, ≥98%) (Sigma-Aldrich), алюминий оксиді (Al_2O_3 , бөлшектер <50 нм, 99,8%) (Sigma-Aldrich), күміс нитраты ($AgNO_3$, 99,8%) (Sigma-Aldrich), кобальт(II) нитраты гексагидраты ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, ≥98%) (Sigma-Aldrich), никель нитраты ($Ni(NO_3)_2$)

(Laborpharma), стронций хлориді гексагидраты ($SrCl_2 \cdot 6H_2O$, 99,7%) (Laborpharma), қымыздық қышқылы ($(COOH)_2 \cdot 2H_2O$, >98%) (Laborpharma) және қымыздық қышқылы ($(COOH)_2$, тазалығы >99%) (MERYER) қолданылды.

2.2. Фотокатализаторды дайындау

Al -мен легірілген $SrTiO_3$ (ASTO) біздің алдыңғы жұмыстарымызда сипатталған әдістемелерге сәйкес синтезделді [19, 20]. $Ag/ASTO/Co$ және $Ag/Ni/ASTO/Co$ үлгілері фотоқондыру әдісімен алынды. Ол үшін 0,2 г ASTO 100 мл дистилденген суда диспергирленіп, кейін металдар жарық әсерінде кезекпен қондырылды. $Ag/ASTO/Co$ үлгісін алу кезінде алдымен 104 мкл $AgNO_3$ ерітіндісі қосылып, 50 мин сәулелендірілді, содан кейін 200 мкл $Co(NO_3)_2$ ерітіндісі енгізіліп, қосымша 10 мин сәулелендіру жүргізілді. $Ag/Ni/ASTO/Co$ үлгісі үшін алдымен 104 мкл $AgNO_3$ қондырылып, 5 мин сәулелендірілді, кейін 176 мкл $Ni(NO_3)_2$ қосылып, 45 мин сәулелендірілді, одан соң 200 мкл $Co(NO_3)_2$ енгізіліп, 10 мин бойы сәулелендіру жалғастырылды. Фотоқондырудан кейін үлгілер дистилденген сумен 5 рет жуылып, 60 °C температурада кептірілді. Бірлескен катализаторлардың жалпы мөлшері фотокатализатор массасының 3 %-ын құрады.

2.3. Сипаттамасы

Үлгілердің морфологиялық қасиеттері 5–20 кВ үдеткіш кернеуге ие Zeiss Crossbeam 540 сканерлеуші электрондық микроскопы (СЭМ) және трансмиссиялық электрондық микроскоп (ТЭМ) арқылы зерттелді. Материалдардың фазалық құрамы D8 ADVANCE (Bruker, $Cu K\alpha$, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) рентгендік дифрактометрінде 40 кВ және 40 мА жұмыс параметрлерінде, $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ бұрыштар диапазонында рентгендік дифракция (XRD) әдісімен анықталды.

2.4. Фотокаталитикалық реакция

$Ag/ASTO/Co$ және $Ag/Ni/ASTO/Co$ композиттік материалдарының CO_2 -ні тотықсыздандыруға арналған фотокаталитикалық сынақтары атмосфералық қысымда және 25 °C температурада герметикалық болат реакторда 300 Вт ксенон шамымен сәулелендіру арқылы жүргізілді. Электрон доноры ретінде су қолданылды. Реакцияны жүргізу үшін 0,1 г фотокатализатор 0,1 М $NaHCO_3$ ерітіндісінің 200 мл көлемінде диспергирленіп,

CO₂ (99,999%) газы 30 мл/мин жылдамдықпен үздіксіз беріліп отырды. Реакция нәтижесінде түзілген газтәрізді өнімдер (H₂, O₂ және CO) «ХРОМОС 1000» газ хроматографында, жалынды иондау детекторымен және жылуөткізгіштік детекторларының көмегімен талданды. Тасымалдаушы газ ретінде аргон қолданылды. Газ хроматографы реакторға тікелей қосылып, сынама-лар әр 1 сағат сайын алынды. Өнімнің шығымы газ хроматографиясының деректері негізінде шыңдардың аудандарын қалыпқа келтіру әдісімен есептелді. Әрбір өнімнің мөлшері реакциядан кейінгі газдың жалпы көлемін және идеал газдың күй теңдеуін ескере отырып, оның газ қоспасындағы көлемдік үлесінен анықталды. Әрі қарай, алынған мәндер фотокатализатордың массасы мен реакция уақытын ескере отырып, мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹ -қа аударылды.

3. Нәтижелер және оларды талқылау

3.1. Үлгілерді сипаттау

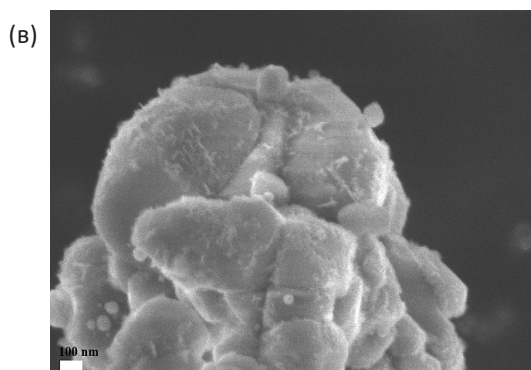
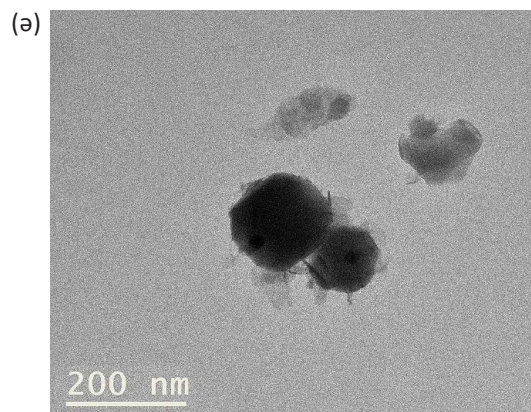
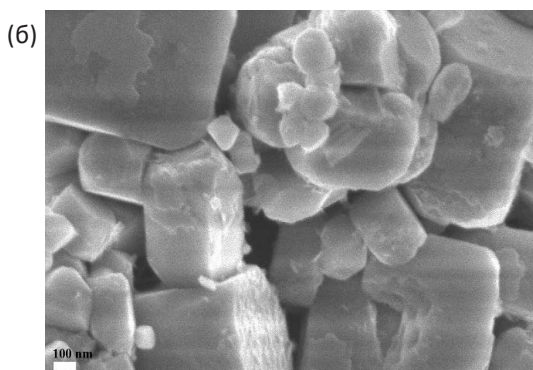
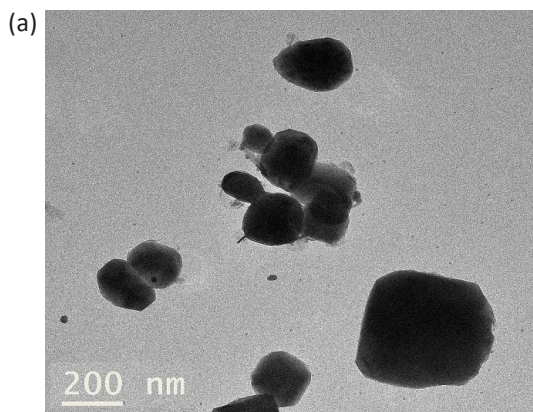
3.1.1. Электронды микроскопиялық талдаулар

1-суретте СЭМ арқылы алынған ASTO нанобөлшектері көрсетілген. Бөлшектер негізінен қырлары жұмырланған куб пішінді болып келеді. Бөлшектердің орташа өлшемі нанометрлік ди-

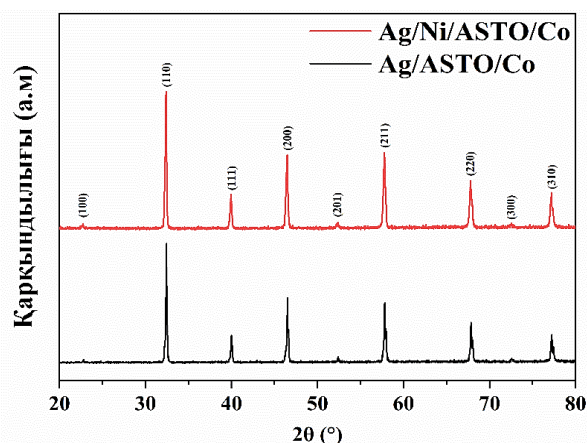
апазонда орналасқан, бұл фотокаталитикалық қолдану үшін қолайлы, себебі өлшемнің кішіреюі меншікті бет ауданын ұлғайтып, жарықты жұту қабілетін жақсартады. Бірлескен катализаторлар ASTO бетінде орналасқан ұсақ бөлшектер түрінде байқалады, (100) және (110) кристаллографиялық қырларында селективті түрде қонады, бұл олардың беттік энергия мен зарядтың таралуына тәуелділігімен сәйкес келеді [21, 22]. 1-сурет (а, б) Ag/ASTO/Co үлгісінде Ag нүкте тәрізді бөлшектер ретінде, ал Co агломераттар түрінде көрінеді. Ал 1 (ә, в) Ag/Ni/ASTO/Co үлгісінде бетінде үлпек тәрізді құрылымдар ретінде байқалатын Ni бөлшектері қосымша анықталады. Аталған бөлшектердің барлығының ASTO бетінде болуы бірлескен катализаторлардың нанобөлшектерге сәтті жүктелгенін растайды.

3.1.2. Рентгендік дифракциялық талдау

2-суретте зерттелген үлгілердің рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері көрсетілген. Бұл әдіс синтезделген ASTO нанобөлшектерінің кристалдық құрылымын растау мақсатында қолданылды. Барлық үлгілерде перовскиттік құрылымға тән дифракциялық шыңдар байқалады және олар JCPDS №35-0734 стандарттық картасының мәліметтерімен сәйкес келеді [23].



Сурет 1. Үлгілерің электронды микроскопиялық кескіндері: (а), (б) Ag/ASTO/Co; (ә), (в) Ag/Ni/ASTO/Co.



Сурет 2. Үлгілердің рентгендік дифракциялық талдауы.

Никель енгізілген үлгілерде негізгі дифракциялық шыңдардың қарқындылығы Ag/ASTO/Co үлгісімен салыстырғанда артқаны байқалады. Бұл материалдың кристаллдылығының жақсарғанын немесе Ni енгізілгеннен кейін кристаллиттердің орташа өлшемінің ұлғайғанын көрсетуі мүмкін [24]. Ag, Ni немесе Co фазаларына сәйкес келетін қосымша шыңдар анықталған жоқ. Мұндай шыңдардың болмауы енгізілген металдардың мөлшерінің аз болуымен, сондай-ақ олардың жоғары дисперстілігімен және бөлшек өлшемдерінің өте кіші болуын түсіндіріледі, бұл оларды рентгендік дифракция әдісімен анықтауды қиындатады.

3.2. CO₂ фотокаталитикалық тотықсыздандыру тиімділігі

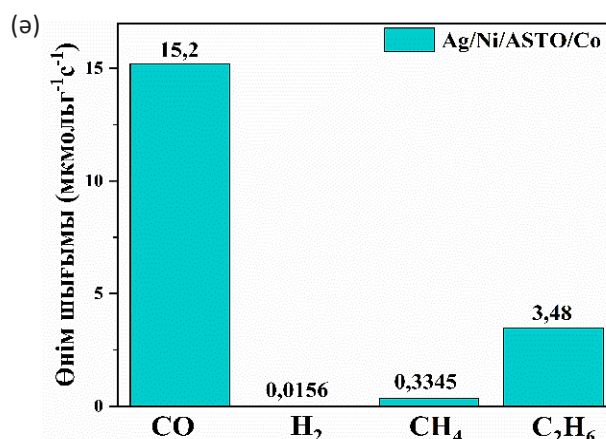
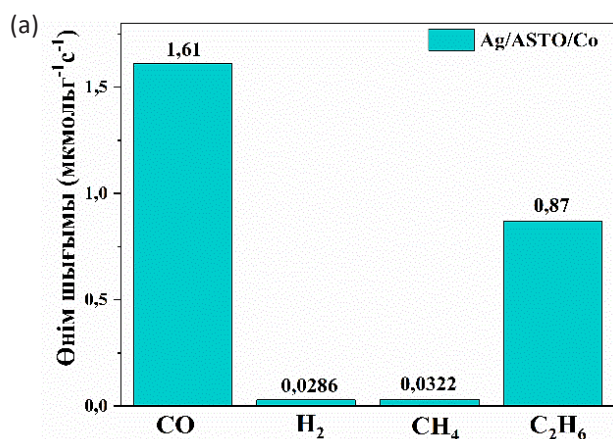
CO₂ фотокаталитикалық тотықсыздандыру процесі 0,1 M NaHCO₃ ерітіндісін қолдану арқылы, тотығуға бейім реагенттер мен фотосенсибилизаторлар қолданбай жүргізілген кезде зерттелген үлгілер арасында өнімдердің шығымы мен селек-

тивтілігінің айқын айырмашылықтарын көрсетті. Алынған нәтижелер бірлескен катализаторлар құрамының процестің белсенділігіне де, реакция өнімдерінің таралуына да елеулі әсер ететінін көрсетті (3-сурет).

Ag/ASTO/Co фотокатализаторы үшін CO₂ негізінен CO түзілуімен тотықсызданды. CO шығымы 1,61 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹ құрап, селективтілігі 63,4%-ға жетті. Өнімдердің едәуір бөлігі этанға тиесілі болды: оның шығымы 0,87 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹, селективтілігі 34,3% болды. Сонымен қатар сутегі (0,0286 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹, 1,13%) және метан (0,0322 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹, 1,27%) түзілуі өте төмен деңгейде байқалды, бұл жанама реакциялардың әлсіз жүретінін көрсетеді.

Ag/Ni/ASTO/Co фотокатализаторы жағдайында CO₂ фотототықсыздандыру тиімділігінің айтарлықтай артуы байқалды. CO шығымы 15,2 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹ дейін өсіп, селективтілігі 79,9%-ға жетті, бұл CO түзілуінің басым екенін дәлелдейді. Этан шығымы да артып, 3,48 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹ болды, алайда оның селективтілігі 18,3%-ға дейін төмендеді. Сутегі (0,0156 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹, 0,082%) және метан (0,3345 мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹, 1,76%) түзілуі төмен деңгейде қалды.

Осылайша, Ag/ASTO/Co жүйесіне Ni енгізу CO₂ фотокаталитикалық тотықсыздандыру процесін айқын күшейтіп, реакцияны негізінен CO түзілу бағытына ығыстырады. CO шығымы мен селективтілігінің едәуір артуы, сонымен қатар сутегі бөлінуі мен метан түзілу реакцияларының басылуы Ag, Ni және Co арасындағы синергетикалық әсерді көрсетеді. Ni-дің әртүрлі тотығу күйлері (Ni⁰/Ni²⁺) электрондарды тиімді ұстап қалып, заряд тасымалдаушыларының рекомбинациясын төмендетуі мүмкін. Сонымен қатар, Ni CO₂ молекуласының адсорбциясы мен активациясын күшей-



Сурет 3. CO₂ фотокаталитикалық тотықсыздандыру кезінде түзілген өнімдердің шығымы (мкмоль·г⁻¹·сағ⁻¹): (а) Ag/ASTO/Co; (ә) Ag/Ni/ASTO/Co.

тіп, белсенді орталықтардың санын арттырады. Бұл әсер заряд тасымалдануы мен бөлінуін күшейтіп, жанама реакцияларды тежеуге ықпал етеді.

Синтезделген фотокатализаторлардың тиімділігін бағалау мақсатында SrTiO_3 негізіндегі, CO_2 фотокаталитикалық тотықсыздандыруға арналған және ұқсас бірлескен катализаторлар қолданылған әдебиеттегі жүйелермен салыстырмалы талдау жүргізілді. Әдебиеттің талдау нәтижелері 1-кестеде көрсетілген. Эксперименттік шарттардағы айырмашылықтарға, соның ішінде жарық көзі, реакциялық орта түрі және катализатор мөлшері сияқты параметрлерге қарамастан, алынған үлгілер салыстырмалы немесе одан жоғары фотокаталитикалық белсенділік көрсетеді. Алынған нәтижелер әзірленген материалдың CO_2 фотокаталитикалық тотықсыздандыру үшін перспективті екенін көрсетеді.

Бұл жұмыста ASTO бетіне селективті фотоқондыру әдісі арқылы қондырылған бірлескен катализаторлардың синергетикалық әсері зерттелді. Морфологиялық және құрылымдық талдаулар бірлескен катализаторлардың сәтті жүктелгенін және жанама фазалардың түзілмей, перовскиттік құрылымның сақталғанын растады. Тотықсыздандырғыш және тотықтырғыш бірлескен катализаторларды жеке-дара селективті фотоқондыру фотогенерацияланған зарядтардың тиімді бөлінуі мен бағытталған тасымалдануын қамтамасыз етіп, CO_2 тотықсыздандыру процесінің белсенділігі мен селективтілігінің артуына әкелді.

Фотокаталитикалық сынақтар фотокатализатор құрамының 0,1 М NaHCO_3 сулы ерітіндісінде, тотығуға бейім реагенттерді қолданбай жүргізілген CO_2 тотықсыздандыру реакциясының белсенділігі мен селективтілігін айқындайтынын көрсетті. Ag/ASTO/Co жүйесінде негізгі өнім CO болып, оның селективтілігі 63,4% құрады. Ал Ni енгізу CO шығымын 9 еседен астам арттырып ($15,2 \text{ мкмоль} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сағ}^{-1}$ дейін), селективтілік-

ті 79,9%-ға дейін жоғарылатты. Бұл ретте сутегі бөлінуі мен метан түзілу реакциялары басылған күйде қалды.

Алынған нәтижелер Ag, Ni және Co арасындағы айқын синергетикалық әсерді көрсетеді, ол фотогенерацияланған зарядтардың тиімді бөлінуі мен тасымалдануын қамтамасыз етіп, CO_2 молекулаларының бағытталған активациясына және CO түзілуіне ықпал етеді. ASTO бетіне бірлескен катализаторларды жеке-дара селективті фотоқондыру қосымша реагенттерді қолданбай CO_2 тотықсыздандыруға арналған селективті әрі тиімді фотокатализаторларды жасаудың әлеуетті стратегиясы болып табылады.

4. Қорытынды

Бұл жұмыста ASTO бетіне селективті фотоқондыру әдісі арқылы қондырылған бірлескен катализаторлардың синергетикалық әсері зерттелді. Морфологиялық және құрылымдық талдаулар бірлескен катализаторлардың сәтті жүктелгенін және жанама фазалардың түзілмей, перовскиттік құрылымның сақталғанын растады. Тотықсыздандырғыш және тотықтырғыш бірлескен катализаторларды жеке-дара селективті фотоқондыру фотогенерацияланған зарядтардың тиімді бөлінуі мен бағытталған тасымалдануын қамтамасыз етіп, CO_2 тотықсыздандыру процесінің белсенділігі мен селективтілігінің артуына әкелді.

Фотокаталитикалық сынақтар фотокатализатор құрамының 0,1 М NaHCO_3 сулы ерітіндісінде, тотығуға бейім реагенттерді қолданбай жүргізілген CO_2 тотықсыздандыру реакциясының белсенділігі мен селективтілігін айқындайтынын көрсетті. Ag/ASTO/Co жүйесінде негізгі өнім CO болып, оның селективтілігі 63,4% құрады. Ал Ni енгізу CO шығымын 9 еседен астам арттырып ($15,2 \text{ мкмоль} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сағ}^{-1}$ дейін), селективтілікті 79,9%-ға дейін жоғарылатты. Бұл ретте сутегі бөлінуі мен метан түзілу реакциялары басылған күйде қалды.

Кесте 1. Синтезделген үлгілердің фотокаталитикалық тиімділігін салыстырмалы бағалау

Фотокатализатор	Реакция шарттары	Өнім	Өнім шығымы ($\text{мкмоль} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сағ}^{-1}$)	Жарық көзі	Сілтемелер
Al/N-STO	8 мг/100 мл	CO	3,82	Ксенон шамы 300 Вт	[6]
$\text{Bi}_2\text{SiO}_5\text{-SrTiO}_3$	20 мг/100 мл/40 мл	CO	10,6	Ксенон шамы 300 Вт	[25]
LSTO-3	30 мг	CO	2,1	Ксенон шамы 300 Вт	[26]
$0.5\text{Ag-}0.5\text{Cu}_2\text{O/TiO}_2$	50 мг	CO	13,19	Ксенон шамы 300 Вт	[27]
Ag/ASTO/Co	0,2 г/100 мл	CO	1,61	Ксенон шамы 300 Вт	Осы жұмыс
Ag/Ni/ASTO/Co	0,2г/100мл	CO	15,2	Ксенон шамы 300 Вт	Осы жұмыс

Алынған нәтижелер Ag, Ni және Co арасындағы айқын синергетикалық әсерді көрсетеді, ол фотогенерацияланған зарядтардың тиімді бөлінуі мен тасымалдануын қамтамасыз етіп, CO₂ молекулаларының бағытталған активациясына және CO түзілуіне ықпал етеді. ASTO бетіне бірлескен катализаторларды жеке-дара селективті фотоқондыру қосымша реагенттерді қолданбай CO₂ тотықсыздандыруға арналған селективті әрі тиімді фотокатализаторларды жасаудың әлеуетті стратегиясы болып табылады.

Author Contributions

Aibol Baratov: Conceptualization; Writing – Original Draft. **Ulzhan Abdikarimova:** Methodology. **Dina Utarova:** Formal Analysis. **Aididar Sailaubek:** Validation. **Chingis Daulbayev:** Writing – Review & Editing. **Zhenisbek Kuspanov:** Writing – Review & Editing.

Мүдделер қақтығысы туралы мәлімдеме

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Алғыс

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің қаржылық қолдауымен №BR24992935 ғылыми жобасы аясында жүзеге асырылды.

References

- [1]. Y. Xu, Y. Liang, Q. He, R. Xu, D. Chen, et al. Review of doping SrTiO₃ for photocatalytic applications. *Bulletin of Materials Science* 46 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12034-022-02826-x>.
- [2]. E.S. Sanz-Pérez, C.R. Murdock, S.A. Didas, C.W. Jones. Direct capture of CO₂ from ambient air. *Chemical Reviews* 116 (2016) 11840–11876. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00173>.
- [3]. N. Saitova, K. Askaruly, N. Idrissov, Z. Kuli, K. Shakenov, et al. MXene-integrated porous carbon–silicon composite as a stable and high-capacity anode for lithium-ion batteries. *Engineering Science* 37 (2025) 1804. <https://dx.doi.org/10.30919/es1804>.
- [4]. J. Sheng, Y. He, M. Huang, C. Yuan, S. Wang, et al. Frustrated Lewis pair sites boosting CO₂ photoreduction on Cs₂CuBr₄ perovskite quantum dots. *ACS Catalysis* 12 (2022) 2915–2926. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c00037>.
- [5]. A. Ghulam Nabi, M. Hayat, S. Khan, S. Nazir, A. Hussain, et al. Photocatalytic properties of SrTiO₃: Impact of (co-)doping with Sc, Cr, Co, Ir and La. *Materials Today Communications* 8 (2025) 100545. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100545>.
- [6]. W. Wang, W. Kang, J. Niu, H. Jian, Q. Shen, et al. Al-N co-doped to reduce Ti₃₊ concentration to suppress charge recombination of polyhedral SrTiO₃ for efficient photocatalytic CO₂ reduction. *Journal of Colloid and Interface Science* 689 (2025) 137266. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.137266>.
- [7]. S. Wang, J. Liu, Y. Liu, D. Shi, J. Xu, et al. Heterojunction tailored engineering for enhanced photoreduction applications on H₂ production and Cr(VI) degradation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 737 (2026) 139757. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2026.139757>.
- [8]. I. Radu, A.I. Borhan, D. Ghercă, D.G. Popescu, C.N. Borca, et al. Enhancement of SrTiO₃ photocatalytic efficiency by Al doping: Structure, morphology and electronic property contributions. *Ceramics International* 50 (2024) 20664–20675. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.188>.
- [9]. M. Zhai, Z. Li, R. Li, Z. Feng, Q. Wang, et al. Modification of Pt cocatalyst on SrTiO₃ with amorphous FeOx towards enhanced photocatalytic overall water splitting. *Journal of Catalysis* 443 (2025) 115989. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2025.115989>.
- [10]. R. Bi, B. Han, Y. Shen, J. Liu, Z. Wang. Enhancing photocatalytic overall water splitting activity of SrTiO₃ nanoparticles by a synergetic Pt/CrOx dual cocatalyst system. *ACS Applied Energy Materials* 6 (2023) 10600–10609. <https://doi.org/10.1021/acsaem.3c01767>.
- [11]. A.P. Sourı, E. Skliri, I. Vamvasakis, G.S. Armatas, V. Binas. Highly active Pt nanoparticles supported on SrTiO₃ for photocatalytic hydrogen production. *Applied Physics A* 130 (2024) 785. <https://doi.org/10.1007/s00339-024-07967-w>.
- [12]. F. Fang, J. Zhang, L. Xiang, C. Chen, N. Feng, et al. Ordering bimetallic Cu–Pd catalysts onto mesoporous SrTiO₃ nanotubular networks for efficient carbon dioxide photoreduction. *Angewandte Chemie International Edition* 63 (2024) e202405807. <https://doi.org/10.1002/anie.202405807>.
- [13]. Z. Kuspanov, A. Serik, A. Baratov, U. Abdikarimova, N. Idrissov, et al. Efficient photocatalytic hydrogen evolution via cocatalyst loaded Al-doped SrTiO₃. *Eurasian Chemico-Technological Journal* 26 (2024) 133–140. <https://doi.org/10.18321/ectj1636>.

- [14]. A. Baratov, Z. Kuspanov, A. Shaimerdenov, G. Yergazyeva, Y. Yerlanuly, et al. Enhancing photogenerated charge separation in perovskite semiconductors via dual cocatalyst engineering. *Journal of Water Process Engineering* 77 (2025) 108573. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108573>.
- [15]. W. Mo, Q. Chen, H. Zhou, W. Zhao, L. Hu, et al. Unveiling the difference in the activity and selectivity of nickel based cocatalysts for CO₂ photoreduction. *Journal of CO₂ Utilization* 68 (2023) 102346. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102346>.
- [16]. X. Shao, X. Yin, J. Wang. Nanoheterostructures of potassium tantalate and nickel oxide for photocatalytic reduction of carbon dioxide to methanol in isopropanol. *Journal of Colloid and Interface Science* 512 (2018) 466-473. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.057>.
- [17]. X. Xiang, Y. Zhu, J. Zheng, Y. Li, T. Zhang, et al. Interfacial field screening governs tribocatalysis in Nb-doped SrTiO₃. *Surfaces and Interfaces* 78 (2025) 108053. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.108053>.
- [18]. M. Maček Kržmanc, N. Daneu, K. Mohaideen, B. Likozar, A. Čontala, et al. Steering the Bi₄Ti₃O₁₂-to-SrTiO₃ hydrothermal transformation for controlling functionality of 2D SrTiO₃ nanoplatelets for photocatalytic H₂ evolution. *Chemical Engineering Journal* 527 (2025) 171758. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171758>.
- [19]. U. Abdikarimova, A. Serik, D. Yessenkeldina, Z. Kuspanov, A. Baratov, et al. Impact of fabrication method on the photocatalytic efficiency of PAN/SrTiO₃@Al composite nanofibers. *Journal of Water Process Engineering* 78 (2025) 108803. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108803>.
- [20]. A. Baratov, C. Daulbayev, Z. Kuspanov. Selective CO evolution from CO₂ over Ag–Ni-based cocatalyst-modified perovskite under simulated solar light. *Eurasian Chemico-Technological Journal* 27 (2025) 281-287. <https://doi.org/10.18321/ectj1675>.
- [21]. U. Sajid, Y. Gao, M. Liu, R. Xu, K. Chang, et al. Strategic vanadium-mediated ion exchange to introduce Al₃₊ doping in SrTiO₃ for enhanced photocatalytic overall water splitting. *Ceramics International* (2026). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.01.078>.
- [22]. S. Wang, K. Teramura, T. Hisatomi, K. Domen, H. Asakura, et al. Dual Ag/Co cocatalyst synergism for highly effective photocatalytic CO₂ conversion by H₂O over Al-SrTiO₃. *Chemical Science* 12 (2021) 4940-4948. <https://doi.org/10.1039/D1SC00206F>.
- [23]. R. Ghandour, A.B.M. Ali, A.A.H. Kadhum, M.A. Diab, H.A. El-Sabban, et al. Activated carbon-based SrTiO₃ derived from palm tree wood for wastewater treatment in continuous systems. *Inorganic Chemistry Communications* 173 (2025) 113898. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.113898>.
- [24]. A. Shahzad, K. Rafiq, M.Z. Abid, H.U.R. Shah, A. Rauf, et al. Catalytic hydrogen evolution on CdZnS system: Synergy between Ni dopants and Ag cocatalysts. *Applied Catalysis A: General* 693 (2025) 120101. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2025.120101>.
- [25]. T. Han, Y. Guo, M. A. Mushtaq, Y. Jia. Facile assembly of Bi₂SiO₅-SrTiO₃ Z-scheme heterojunctions for enhanced photocatalytic CO₂ conversion and pollutant degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 13 (2025) 117604. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117604>.
- [26]. M. Li, W. Wang, Y. Ji, X. Luo, M. Liu, et al. Tuning activity and selectivity of photocatalytic CO₂ reduction through synergistic effect of lanthanum doping and silver cocatalyst in SrTiO₃. *Journal of Rare Earths* (2026). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2026.04.002>.
- [27]. X. Wang, Z. Jiang, H. Chen, K. Wang, X. Wang. Photocatalytic CO₂ reduction with water vapor to CO and CH₄ in a recirculation reactor by Ag-Cu₂O/TiO₂ Z-scheme heterostructures. *Journal of Alloys and Compounds* 896 (2022) 163030. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163030>.

Author information

A.G. Baratov – PhD student, Satbayev University. Institute of Nuclear Physics, Researcher of the Laboratory of Electrochemical Conversion and Storage of Energy, Almaty, Kazakhstan
E-mail: baratovaibol01@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7240-5259>

U.A. Abdikarimova – PhD student, Satbayev University. Institute of Nuclear Physics, Researcher of the Laboratory of Electrochemical Conversion and Storage of Energy, Almaty, Kazakhstan
E-mail: ulzhanabdi01@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3557-0894>

D.A. Utarova – Junior Researcher of the Laboratory of Electrochemical Conversion and Storage of Energy, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
E-mail: dinautarova.556430@gmail.com

A. Sailaubek – Junior Researcher, Laboratory of Electrochemical Conversion and Storage of Energy, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
E-mail: aididarsailaubekqyzy@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6461-5787>

Zh.B. Kuspanov – Senior Researcher, Laboratory of Electrochemical Conversion and Storage of Energy, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
E-mail: zhenis.kuspanov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2734-5346>

Ch.B. Daulbayev – PhD, Head of Laboratory of Electrochemical Conversion and Storage of Energy, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
E-mail: ch.daulbayev@inp.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-7799>

Enhancing Photocatalytic CO₂ Reduction via Selective Photodeposition of Metal Cocatalysts on a Semiconductor

A.G. Baratov^{1,2}, U.A. Abdikarimova^{1,2}, D.A. Utarova², A. Sailaubek², Ch.B. Daulbayev², Zh.B. Kuspanov^{2*}

¹Satbayev University, Satpaev Str., 22, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Nuclear Physics, Ibragimov Str., 1, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This study investigates the effect of selective photodeposition of reduction and oxidation cocatalysts (Ag, Ni, and Co) on ASTO, enabling efficient charge separation and directed activation of CO₂. Photocatalytic tests revealed that CO was the main product over the Ag/ASTO/Co sample, with a yield of 1.61 μmol·g⁻¹·h⁻¹ and a selectivity of 63.4%. The introduction of Ni increased the CO yield by more than nine times (up to 15.2 μmol·g⁻¹·h⁻¹) and improved selectivity to 79.9%, while H₂ evolution and CH₄ formation reactions remained suppressed. The obtained results demonstrate a pronounced synergistic effect between Ag, Ni, and Co and propose an effective strategy for designing selective and efficient photocatalysts for CO₂ reduction in aqueous media without additional reagents.

Keywords: photocatalysis, CO₂ reduction, ASTO photocatalyst, selective photodeposition, dual cocatalyst

Повышение фотокаталитического восстановления CO₂ посредством селективного фотоосаждения металлических сокатализаторов на полупроводнике

А.Г. Баратов^{1,2}, У.А. Абдикаримова^{1,2}, Д.А. Утарова², А. Сайлаубек², Ч.Б. Даулбаев², Ж.Б. Куспанов^{2*}

¹Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

²Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследовано влияние селективного фотоосаждения восстановительных и окислительных сокатализаторов (Ag, Ni и Co) на материал ASTO, обеспечивающего эффективное разделение зарядов и направленную активацию CO₂. Результаты фотокаталитических испытаний показали, что для образца Ag/ASTO/Co основным продуктом являлся СО с выходом 1.61 мкмоль·г⁻¹·ч⁻¹ и селективностью 63.4%. Введение Ni приводило к увеличению выхода СО более чем в 9 раз (до 15.2 мкмоль·г⁻¹·ч⁻¹) и росту селективности до 79.9%, при этом реакции выделения H₂ и образования CH₄ оставались подавленными. Полученные результаты демонстрируют выраженный синергетический эффект Ag, Ni и Co и предлагают эффективную стратегию создания селективных фотокатализаторов для восстановления CO₂ в водной среде без применения дополнительных реагентов.

Ключевые слова: фотокатализ, восстановление CO₂, фотокатализатор ASTO, селективное фотоосаждение, двойные сокатализаторы