

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

Құрманбек Еламан

«Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және
оңтайландыру»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B07109 – «Инженерлік физика және материалтану» мамандығы

Алматы 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
«Материалтану, нанотехнологиялар
және инженерлік физика»
кафедрасының меңгерушісі,
PhD докторы,
К.К.Кудайбергенов
«29» мамыр 2023ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық
дизайны және оңтайландыру»

6B07109 – «Инженерлік физика және материалтану»
білім беру бағдарламасы

Орындаған:

Құрманбек Е.

Пікір беруші
PhD

Досжанов Е.О.
«29» мамыр 2023ж

Ғылыми жетекші
PhD, ассоц. профессор,

Шаленов Е.О.
«30» мамыр 2023ж

Алматы 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

БЕКІТЕМІН

«Материалтану, нанотехнологиялар
және инженерлік физика»
кафедрасының меңгерушісі,

PhD докторы,

Кудайбергенов.К.К

«29» мамыр 2023ж.

Дипломдық жұмыс орындауға

ТАПСЫРМА

Білім алушы: Құрманбек Еламан

Тақырыбы: «Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және оңтайландыру»

Университет ректорының "22" қараша 2022 жылғы №408 П/Ө бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі "30" мамыр 2023 ж.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер:

- 1) Әртүрлі кері контактты күн элементтерінің Пойнтинг векторы арқылы генерация жылдамдығын зерттеу;
- 2) Әртүрлі күн элементтерінің рекомбинация жылдамдығының әсерін қарастыру;
- 3) Диффузия ұзындығы мен беттік рекомбинация жылдамдығының тәуелділігін PSE бойынша зерттеу;
- 4) Әртүрлі кері контакты күн элементтерін интерфейс тұзағы мен көлемдік ақаудың тығыздықтарының тәуелділігін зерттеу.

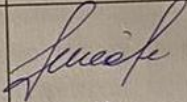
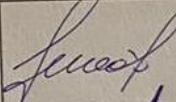
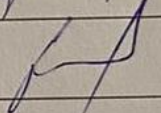
Ұсынылған негізгі әдебиет 33 атаудан тұрады.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

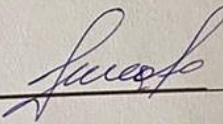
Бөлім атаулары, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге, кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Әдеби шолу	16.01.2023-16.02.2023	
Теориялық жұмыс	17.02.2023-03.05.2023	
Нәтиже мен талдау	04.05.2023	

Қолтаңбалары

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа (жобаға) қойылған қолтаңбалары (жұмысқа қарасты тараулардың нұсқауымен)

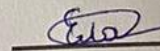
Бөлімдер атауы	Ғылыми жетекші, кеңесшілер (аты-жөні, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қолтаңба қойылған мерзімі	Қолы
Әдеби шолу	Шаленов Е.О., Phd, асс. профессор	30.05.23	
Теориялық жұмыстар	Шаленов Е.О., Phd, асс. профессор	30.05.23	
<u>Нормоконтролер</u>	Бейсебаева А.С., ф. - м.ғ.н. аға оқытушы	24.05.23	

Ғылыми жетекшісі



Шаленов Е.О.

Тапсырманы орындауға білім алушы



Құрманбек Е.

Күні « 30 » мамыр 2023 ж.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс 3 тараудан, 44 беттен, 18 суреттен, 1 кестеден, 33 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

Тақырыбы: «Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және оңтайландыру»

ПЕРОВСКИТ КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІ, КЕРІ КОНТАКТТЫ, КҮН ЭНЕРГЕТИКАСЫ, САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Жұмыстың мақсаты: Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және оңтайландыру

Зерттеу әдістері: модельдеу үшін COMSOL Multiphysics, MatLab және Origin Pro бағдарламаларын қолданылды.

Дипломдық жұмыстың маңыздылығы: Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық және электрлік қасиеттерін зерттеу

Зерттеудің нәтижелері: Квази-біріктірілген кері контактты, жазық-біріктірілген кері контактты және біріктірілген кері контактты құрылғылары үшін генерация жылдамдықтарын Пойнтинг векторы арқылы зерттедік. Квази-біріктірілген кері контактты құрылғысын пайдаланған кезде энергияны түрлендіру тиімділігінің мәні 25.72% тең және басқа құрылғыларға қарағанда жақсы көрсеткішке ие болды. Беттік рекомбинацияның жылдамдығы $S_{n,p} = 100$ см/с, көлемдік ақаудың тығыздығы 10^{17} см⁻³ және интерфейс тұзағының тығыздығы 10^{10} см⁻² мәндерден аз болған жағдайда квази-біріктірілген кері контактты құрылғысын қолдану тиімдірек болып шықты.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа состоит из 3 глав, 44 страниц, 18 рисунков, 1 таблицы, 33 списка использованной литературы.

Тема: "оптическая конструкция и оптимизация перовскитных солнечных элементов с обратным контактом»

ПЕРОВСКИТ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ, СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Цель работы: оптическая конструкция и оптимизация перовскитных солнечных элементов с обратным контактом

Методы исследования: для моделирования использовались программы COMSOL Multiphysics, MatLab и Origin Pro.

Важность дипломной работы: исследование оптических и электрических свойств перовскитных солнечных элементов с обратным контактом

Результаты исследования: мы исследовали скорости генерации с помощью вектора Пойнтинга для устройств с Квазиинтегрированным обратным контактом, плоскоинтегрированным обратным контактом и комбинированным обратным контактом. При использовании квазиинтегрированного устройства с обратным контактом значение эффективности преобразования энергии равно 25.72% и имеет лучшую производительность, чем другие устройства. При скорости поверхностной рекомбинации $S_{n,p} = 100$ см/с, плотности объемного дефекта менее 10^{17} см⁻³ и плотности интерфейсной ловушки менее 10^{10} см⁻² использование квазиинтегрированного устройства с обратным контактом оказалось более эффективным.

ANNOTATION

The thesis consists of 3 chapters, 44 pages, 18 Figures, 1 Table, 33 lists of references.

Topic: "optical design and optimization of perovskite reverse contact solar elements"

PEROVSKITE SOLAR ELEMENTS, REVERSE CONTACT, SOLAR POWER, NUMERICAL MODELING

Purpose of the work: optical design and optimization of perovskite reverse contact solar elements

The importance of the thesis: study of the optical and electrical properties of perovskite reverse contact solar elements

Results of the study: we studied the generation rates for quasi-combined reverse contact, Flat-combined reverse contact and combined reverse contact devices using the Poynting vector. When using a quasi-combined reverse contact device, the energy conversion efficiency value was equal to 25.72% and had a better performance than other devices. It turned out to be more effective to use a quasi-combined reverse contact device if the surface recombination rate is $S_{n,p} = 100 \text{ cm/c}$, the density of the volumetric defect is less than the values of 10^{17} cm^{-3} and the density of the interface trap is less than 10^{10} cm^{-2} .

МАЗМҰНЫ

	КІРІСПЕ	9
1	Әдеби шолу	11
1.1	Жаһандық жылыну	11
1.2	Парниктік газдар шығарындылары	12
1.3	Жаңартылатын энергия өндірісі	14
1.4	Кремний күн модульдеріне салынған инвестициялардың қаржылық орындылығы және өтелу уақыты	16
1.5	Көп ауыспалы күн батареялары, жұқа пленкалы күн батареялары және жаңа күн технологиялары	18
1.5.1	Перовскит күн батареяларының пайда болуы	19
2	Негізгі бөлім	21
2.1	Перовскит материалының қасиеттері	21
2.2	Перовскит күн батареяларының жұмыс принципі.	23
2.2.1	Энергетикалық диаграмма	24
2.2.2	Электрондық селективті қабаттар	25
2.2.3	Саңылауларға таңдамалы қабаттар	26
2.2.4	Электродтар	27
3	Нәтижелер және талқылау	29
3.1	Оптикалық модельдеу. Пойтинг векторы	31
	ҚОРЫТЫНДЫ	40
	Қысқартылған сөздер	41
	ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТ ТІЗІМІ	42

КІРІСПЕ

Бұрын–сонды болмаған фотоэлектрлік қасиеттеріне байланысты органикалық-бейорганикалық гибридті галогенді перовскитті күн элементтері (ПКЭ) фотоэлектрлік жүйелердің келесі буыны үшін негізгі құрылғыларға айналады. Қазіргі уақытта ПКЭ энергияны түрлендіру тиімділігі (ЭТТ) 25,80% жетті. Өртүрлі архитектуралар мен материалдарды пайдалана отырып, 20% - дан астам тиімділікке оңай қол жеткізуге болады. ПКЭ арзан материалдар, оңай жасау және фотоэлектрлік түрлендірудің жоғары тиімділігі сияқты теңдесі жоқ қасиеттеріне байланысты назар аударады. Содан бері ПКЭ -ге қатысты көптеген теориялық және эксперименттік зерттеулер жүргізілді, соның ішінде оптикалық дизайн, материалды таңдау, процесті оңтайландыру, энергия диапазонын сәйкестендіру және интерфейс. Осылайша, ПКЭ тиімділігі мен тұрақтылығы айтарлықтай жақсарды. Дегенмен, ЭТТ ПКЭ мүмкін болатын жақсартулар үшін әлі де мүмкіндіктер бар. Жетілдірілген жарық түсіру құрылымы және фотонды Кристалл технологиясы күн элементтері (КЭ) фотон тығыздығын (J_{ph}) арттырудың ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Бұған дейін модельдеу арқылы ПКЭ үшін тиімді жарықтандыруды басқаруды жүзеге асыратын бірнеше жетілдірілген жарық түсіру құрылымдары туралы хабарланған, сонымен қатар эксперименттік. Мысалы, жарықты түсіру құрылымы, кері шағылыстырғыштар немесе текстуралы беті бар шағылысқа қарсы матрица жасалды. Әдебиеттегі келесі екі маңызды кемшілікті толығымен пайдалану қажет; i) ПКЭ -де тікелей күн сәулесін толық пайдалану; ii) фотондардың ену тереңдігі пленканың қалыңдығынан үлкен болуы керек, әсіресе тыйым салынған аймаққа жақын, бұл жарық сіңіру тиімділігінің күрт төмендеуіне әкеледі. Жоғарыда аталған мәселелер ПКЭ фотондарының сіңуін күшейту үшін жарықты тиімді басқаруды қажет етеді. Перовскит қабатының Жарық сіңіруін арттыру үшін көптеген жетілдірілген нанокұрылымдар жасалды. Алайда, бұл нанокұрылымдар тасымалдаушыларды тасымалдауға кедергі келтіреді, нәтижесінде ЭТТ төмендейді. Фотонды диапазонның ені және фотонды кристалдардың (ФК) баяу фотонды әсері фотонды байыту тиімділігін тиімді арттыра алады. Осылайша, ФК құрылымын ФК-ке енгізуге болады және күн батареяларының Жарық реакциясын ФК кеңейту үшін КЭ-нің ерекше оптикалық қасиеттерін қолдануға болады. ФК оптикалық өнімділігін жақсарту үшін ФК-ге тағы бір тәсіл-фотоактивті қабаттағы квази-басқарылатын резонансты қоздыру, қажетті қабаттағы электромагниттік өрістің үлкен концентрациясын сақтау және J_{ph} КЭ күшейту. ПКЭ -де Опал тәрізді Фотон-кристалды құрылымды сәтті қолдану және құрылғының фотоэлектрлік түрлендіру тиімділігін арттыру теориялық жобалау және эксперименттерге дайындық тұрғысынан тиісті әдебиеттерде жарияланды. Дегенмен, ФК технологиясын ПКЭ -ге эксперименталды түрде біріктіру өте қиын. Демек, осындай арнайы құрылымы бар ПКЭ-ты жобалау үшін сандық модельдеу технологиясын қолдану үлкен практикалық маңызға ие.

Бұл жұмыста біз алдымен сандық модельдеу үшін соңғы элементтер әдісін (СЭӘ) қолданатын ықтимал модельдеу әдісін анықтаймыз, Максвелл теңдеулерін

шешеміз, оны жиілік аймағының сипаттамасымен біріктіреміз және электр өрісінің жалпақ таралуын аламыз. СЭӨ күн батареяларының оптоэлектрондық қасиеттерін зерттеу үшін кеңінен қолданылады. ПКЭ -тің күн спектріне реакциясын күшейту үшін біз алдымен ағартатын жабынды нанокұрылымдармен және ФК технологиясымен (НФК) біріктірдік және теориялық тұрғыдан көп бағытты Жарық реакциясы бар ПКЭ жаңа түрін жасадық. Әдебиетте сипатталғандай нанокұрылымдарымен біріктірілген негізгі материал ретінде TiO_2 бар перовскит сфераларынан тұратын опал тәрізді ФК-ден тұратын ПКЭ. Содан кейін біз nspc құрылымы бар ПКЭ перовскит сферасының r диаметрін, N және D биіктігін оңтайландырдық. Кейіннен біз ПКЭ оптикалық қасиеттерін салыстырдық және ПКЭ жарықты сіңірудің физикалық механизмін әртүрлі NSPC құрылымдарымен анықтадық. Соңында біз ПКЭ оптикалық параметрлерінің жарықтың түсу бұрышына және перовскит пленкасының қалыңдығына реакциясын зерттедік. Демек, табиғатпен шабыттандырылған жаңа nspc құрылымы бар ПКЭ кең жолақты сіңіру және жан-жақты ағарту сипаттамаларына ие. Қосымша ақпаратта шекаралық шарттарды модельдеу мен теңшеудің егжей-тегжейлі әдістері келтірілген. Бұл жұмыс ФК технологиясын қолдану параметрлерін кеңейту және жоғары тиімді ПКЭ үшін жаңа конструкцияларды ашу шегінде.

1. Әдеби шолу

1.1 Жаһандық жылыну

"Жаһандық жылыну" термині 30 жыл ішінде орташа жер үсті ауасы мен теңіз бетінің орташа жаһандық температурасының жоғарылауын білдіреді. Ол әдетте консистенцияны қамтамасыз ету үшін индустрияға дейінгі деңгейге (1850-1900) қатысты Цельсий бірліктерімен көрсетіледі, дегенмен бастапқы нүкте кейде жоғарыда аталған кезеңдегі деректердің болмауына немесе шектеулі болуына байланысты өзгеруі мүмкін.

«Жаһандық жылыну $1,5^{\circ}\text{C}$ » туралы арнайы есеп ЖЖ1.5-те ұсынылған климаттың өзгеруі жөніндегі үкіметаралық комиссия (КӨЖҮК)-тің қазіргі бағалаулары қазірдің өзінде индустрияға дейінгі кезеңмен салыстырғанда жаһандық температураның $1,0^{\circ}\text{C}$ жоғарылауын көрсетеді, мысалы: Годдард ғарыштық зерттеулер институтының беткі температураны талдауы, ұлттық мұхиттық және атмосфералық зерттеулер институтының жаһандық беткі температурасы. Әкімшілік және Хадли орталығының Климаттық зерттеулер бөлімі жинаған мәліметтер, жетіспейтін деректермен, Хансен және басқалар экстраполяциялаған, Восе және басқалар және Морис бірге автор. Сәйкесінше және Карл және басқалар ұсынған қосымша түзетулер. Сонымен қатар Cowtan және Way. сонымен қатар, ЖЖ1.5 сәйкес және жоғарыда келтірілген мәліметтер жиынтығына сүйене отырып, жаһандық орташа температура онжылдықта $0,2 (\pm 0,1)^{\circ}\text{C}$ жылдамдықпен көтерілуді жалғастыруда.

Жаһандық температураның жоғарылауы атмосферада инфрақызыл сәулеленуді сіңіретін және қайта шығаратын парниктік газдардың (ПГ) жиналуымен түсіндіріледі. Бұл ПГ-ге көмірқышқыл газы, метан, азот оксиді және фторланған газдар жатады. Соңғы бірнеше онжылдықта адамның іс-әрекеті мен қарқынды азаматтық дамуы атмосферадағы парниктік газдардың табиғи концентрациясының теңгерімсіздігіне әкелді. КӨЖҮК климаттың өзгеруін бағалау туралы 5-ші есебіне сәйкес (КӨ5), [3] 2010 жылы парниктік газдардың жалпы жылдық антропогендік шығарындылары $49 (\pm 4,5) \text{ GtCO}_2 \text{ eq/yr}$ (жылына CO_2 эквивалентінің гигатоннасы), $0,4 \text{ GtCO}_2 \text{ eq/yr}$ жылдамдығымен өсті./ 1970 жылдан 2000 жылға дейінгі жыл. және $1,0 \text{ GtCO}_2 \text{ eq/yr}$ жылдамдықпен./ 2000 жылдан 2010 жылға дейін. Шығарындылар жаһандық және ұлттық ауқымда жүзеге асырылатын көптеген жеңілдету стратегияларына қарамастан жоғары қарқынмен өсуде. Әлемдік орташа температураның $1,0^{\circ}\text{C}$ -қа айтарлықтай көтерілуінің жойқын салдары қазірдің өзінде байқалады.

Көптеген есептер полярлық мұз қабаттарының еруінен туындаған орташа жаһандық теңіз деңгейінің жылдам көтерілуін сипаттайды. [6] жұмыста нәтижесінде аралдар, ойпаттар мен жағалау аймақтары жойқын топырақ эрозиясын бастан кешіреді және ақырында құнарсыз болады. Азық-түлік қауіпсіздігінің төмендеуі және жер асты суларының ластануы жақын арада климаттың өзгеруінен туындаған адамдардың көші-қон толқынын тудырады деп [7] жұмыста болжануда. Сонымен қатар, атмосферадағы көмірқышқыл газының

жоғары концентрациясы теңіз суындағы гидролизді күшейтеді, осылайша сутегі иондарының концентрациясын жоғарылатады және мұхиттың рН деңгейін төмендетеді. мұхиттың антропогендік қышқылдануы теңіз флорасы мен фаунасына қатты әсер етеді және маржан рифтерінің тез қысқаруына әкеледі.

Ел ішінде жануарлар мен өсімдіктердің көптеген түрлеріне тіршілік ету ортасының жоғалуы нәтижесінде климаттың өзгеруінен қауіп төніп тұр. Қоршаған орта мен флораның өзгеруі [9] жұмыста жануарлардың жоғары ендіктерге қоныс аударуына әкелді, олардың орташа жылдамдығы жылына ~1,7 км және жоғары биіктіктерге орташа жылдамдығы 1,1 м/жыл [10], бұл үлкен әсер етеді. экожүйелер және адамның әл-ауқаты. мысалы, зооноздық және бактериялық тропикалық аурулардың таралуы бүкіл әлемде байқалды. жаһандық жылынуға байланысты ауа-райының экстремалды құбылыстарының жиілігі мен күші де артады деп күтілуде. Жақын арада қатты жылу, қатты жауын-шашын, су тасқыны, құрғақшылық, өрт және қатты жел күшейеді деп болжануда.

Климаттың өзгеруінің жойқын әсерін біле отырып, парниктік газдардың барлық антропогендік шығарындыларын дереу тоқтату қажет. Өкінішке орай, парниктік газдардың лезде таза нөлдік шығарындылары болса да, жаһандық температура алдағы бірнеше жылда уақытша өсуді бастан кешіреді [12].

1.2 Парниктік газдар шығындылары

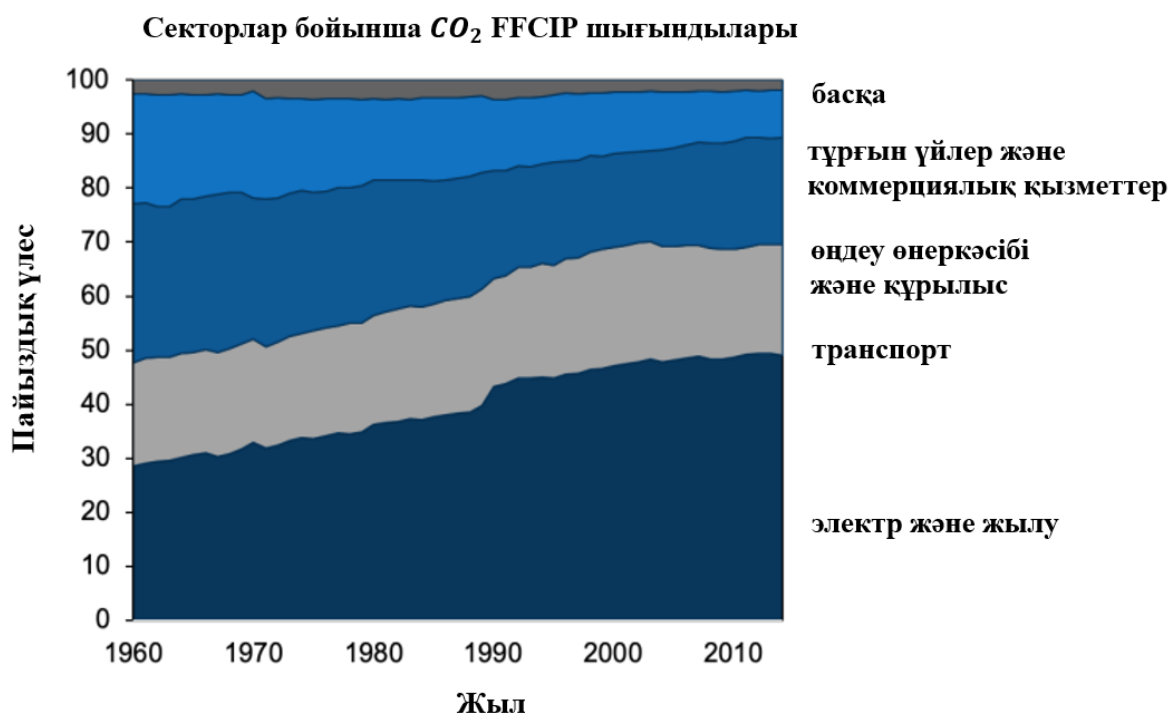
Жаһандық шығарындылардың жалпы өсу тенденциясында негізгі парниктік газдардың пайыздық үлесі соңғы бірнеше онжылдықта тұрақты болып қала береді. үш негізгі парниктік газдар және олардың 2010 жылғы антропогендік шығарындылардың жалпы жылдық көлеміне қосқан үлесі 1.1 суретте көрсетілген.



1.1 сурет - Негізгі парниктік газдардың 2010 жылғы антропогендік шығарындылардың жалпы жылдық көлеміне пайыздық үлесі

Метанның негізгі көздері (жалпы шығарындылардың 17%) ауыл шаруашылығы және қалдықтарды кәдеге жарату болып табылады. Азот оксиді (жалпы шығарындылардың 7%) негізінен ауыл шаруашылығында және қазба отындарын жағу кезінде түзіледі. Шығарындылардың жалпы көлемінің шамамен 74% - ы қазба отындарын жағу және өндірістік процестер нәтижесінде көмірқышқыл газының шығарындылары (ҚОЖӨПНКГШ), орман шаруашылығы және басқа да жер пайдалану нәтижесінде көмірқышқыл газының шығарындылары (ОШПНКГШ).

1.2 суреттен көріп отырғанымыздай, ҚОЖӨПНКГШ көмірқышқыл газының шығарындыларына электр және жылу өндірісі секторы (~50% ҚОЖӨПНКГШ), одан кейін көлік (~20% ҚОЖӨПНКГШ), өңдеу өнеркәсібі және құрылыс (~20% ҚОЖӨПНКГШ) үлкен үлес қосады.



1.2 сурет - Жаһандық көмірқышқыл газының шығарындылары секторлар бойынша бөлінеді. [13] деректерге негізделген: Creative Commons лицензиясы бойынша (CC BY-SA 4.0)

Әлемдік электр энергиясын тұтыну соңғы бірнеше онжылдықта жылына 400 миллиард киловатт-сағаттық сызықтық қарқынмен тез өсті және планета халқының саны мен әл-ауқатының артуына байланысты бұл тенденцияның жақын болашақта баяулайтынын көрсететін белгілер жоқ. Сонымен қатар, энергияны сақтау шешімдерінің бағасының төмендеуіне байланысты көлік секторын электрлендіру айқынырақ болады деп күтілуде бұл электр және жылу өндіру секторында шығарындылардың одан да көп өсуіне әкеледі.

Электр энергиясын көбірек жеткізуге деген қажеттіліктің артуы, оны өндірудің салдарымен қатар, адамдарды балама көздерді іздеуге мәжбүр етті. Бұл қазіргі уақытта электр энергиясына әлемдік сұраныстың ~25% қанағаттандыруға жауап беретін жаңартылатын энергия көздерінің (ЖЭК) керемет өсуіне әкелді.

1.3 Жаңартылатын энергия өндірісі

АҚШ-тың энергетикалық ақпарат басқармасы жинаған мәліметтерге сүйене отырып, қазіргі уақытта бүкіл әлемдегі жаңартылатын энергия көздерінің шамамен 70% - бүкіл әлемдегі гидроэлектростанциялар өндіреді (1.3 суретте). гидроэлектр энергиясы су ағынымен басқарылатын турбинаның айналмалы қозғалысы арқылы өндіріледі, осылайша кинетикалық энергияны электр энергиясына айналдырады. Өкінішке орай, судың жоғары қажеттілігі, ауа-райына маусымдық тәуелділік және үлкен бастапқы шығындар қазіргі уақытта тоқырауға ұшыраған сектордың өсуін шектеді. Сол сияқты, жел турбиналары (әлемдік электр энергиясын өндірудің 16%) тұрақты, тұрақты желмен (мысалы, тегіс және жағалаудағы аудандар немесе тау асулары) және ірі бастапқы инвестициялармен ерекше жағдайларды қажет етеді



1.3 сурет - Жаңартылатын көздерден электр энергиясын өндірудің пайыздық үлесі [14]

Бір қызығы, күн энергетикасы (қазіргі уақытта әлемдік регенерацияның ~6% - ғана құрайды) ЖЭК секторының ең жылдам дамып келе жатқан секторы

болып табылады және 2010 жылдан бері он еседен астам өсті. күн энергиясының басқа жаңартылатын энергия көздеріне қарағанда бірқатар айқын артықшылықтарын ескере отырып, бұл таңқаларлық емес.

Гидро және жел электр станцияларынан айырмашылығы, күн панельдері (фотоэлектрлік модульдер деп те аталады) ерекше жағдайларды қажет етпейді және оларды жер шарының кез келген жеріне орнатуға болады. (күн радиациясы төмен аудандарда тиімділіктің төмендеуі). Күн технологиясы бірнеше киловатт шағын тұрғын үй жүйелерінен жүздеген мегаватт ірі күн электр станцияларына дейін оңай масштабталады. Шағын жүйелер үшін-күн электр қуатын жергілікті жерде пайдалануға болады және электр желісіне қосылуды қажет етпейді, бұл оны шалғай және оффшорлық аймақтарда қолдану үшін ерекше тартымды етеді.

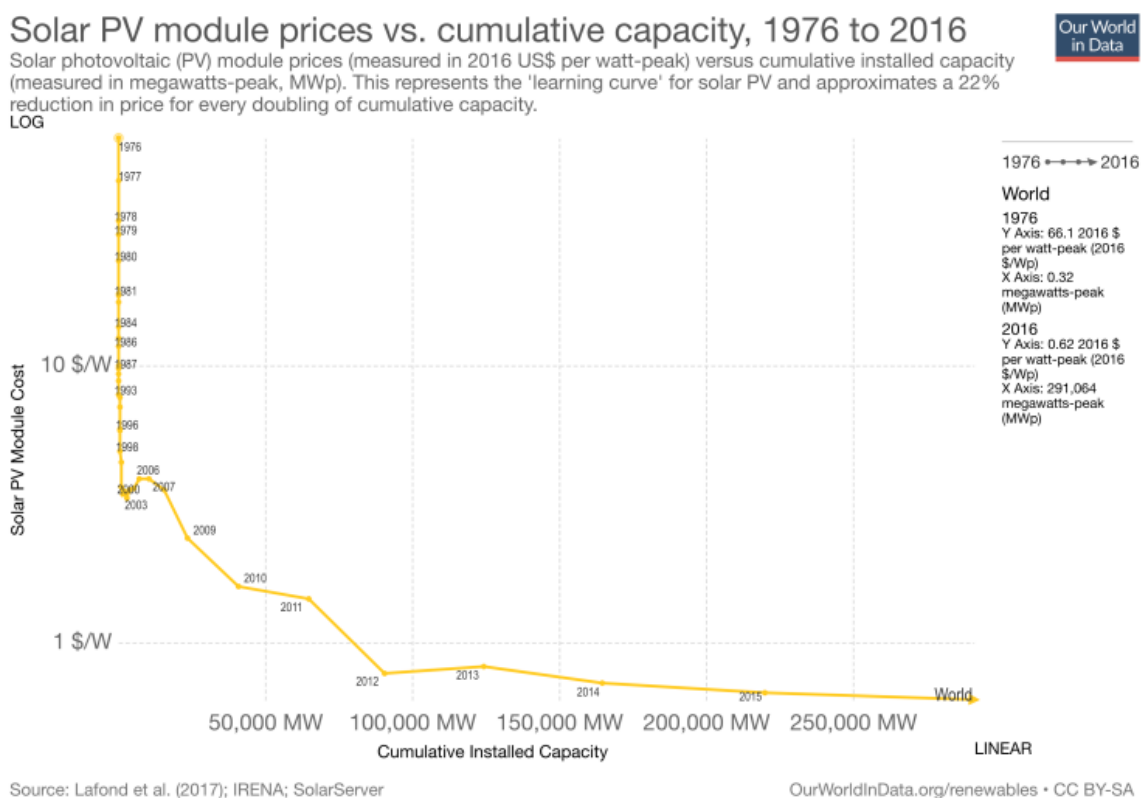
Күн электр энергиясын өндіру фотоэлектрлік модульдерді (ФМ) өндіру процесінде шығарылатындарды қоспағанда, парниктік газдардың ағымдағы шығарындыларымен байланысты емес. Коммерциялық поликристалды кремний күн батареяларының орташа өтелу мерзімі 3,1 жыл. [14] жұмыста сонымен қатар, күн энергиясының көміртегі ізі ондаған грамм экв диапазонында. $CO_2 eq/kWh$ күн панельдерінің әр түрлі типтері және олардың географиялық орналасуы үшін, бұл көмірге, қоңыр көмірге, мұнайға және табиғи газға қарағанда әлдеқайда төмен. электр энергиясының көміртегі ізі басқа көздерде хабарланды.

Биомассадан электр энергиясын өндіру осы салада дау тудырды. бір жағынан, биомасса (мысалы, ағаштар) фотосинтез процесінде ПП-ны ұстайды, бірақ екінші жағынан, жылу мен электр энергиясын өндіру үшін биомассаны жағу керек. Биомассаны жағу кезінде көмірқышқыл газының бөліну процесі оны өсімдіктердің өсуі арқылы алуға қарағанда әлдеқайда жылдам. Бұл сонымен қатар парниктік газдар шығаратын жергілікті ошақтардың пайда болуына әкеледі, сондықтан (күн панельдерінен айырмашылығы) биомасса электр станциялары әдетте қалалық жерлерден алыс орналасады. Сонымен қатар, ормандарды кесу жергілікті түрлердің тіршілік ету ортасын жоғалтуға әкеледі және ормандардың биоәртүрлілігіне қауіп төндіреді. Ағаштар табиғи көміртекті сіңіру арқылы атмосферадағы парниктік газдардың концентрациясының төмендеуіне айтарлықтай ықпал етеді. Қазіргі уақытта жыл сайынғы антропологиялық көміртегі шығарындыларының ~30% жинайды деп есептеледі.

Сонымен, күн панельдерінің маңызды артықшылығы - олардың техникалық қызмет көрсетудің төмен қажеттілігі. Күн панельдерінде электр энергиясы күн энергиясын электр энергиясына тікелей түрлендіру арқылы өндіріледі, ешқандай қозғалмалы бөліктерді пайдаланбай. Кәдімгі консервация кірдің жиналуын болдырмау үшін панельдерді үнемі сумен жууды, сондай-ақ электронды компоненттерді (мысалы, кабельдер, қосқыштар, инвертор) тексеруді қамтиды.

1.4 Кремний күн модульдеріне салынған инвестициялардың қаржылық орындылығы мен өтелу уақыты

Фотоэлектрлік модульдердің жоғарыда аталған артықшылықтары тұрғын үй мақсаттары үшін пайдаланылатын шағын кремний күн панельдеріне, сондай-ақ ауқымды күн фермаларын қаржыландыратын ірі инвесторларға жұртшылықтың назарын аударды. Бұл фотоэлектрлік модульдер индустриясының дамуын едәуір жеделдетті және күн панельдерінің бағасына әсер етті. Соңғы бірнеше онжылдықта фотоэлектрлік модульдердің белгіленген қуатының өсуімен бірге күн модульдерінің орташа бағасы он еседен астам төмендеп, $\sim 0,60$ // Вт-қа дейін төмендеді (ватт үшін ең жоғары американдық доллар) және қазіргі уақытта ол әлі де аздап төмендеуде (сурет. 1.4).



1.4 сурет - Уақыт өте келе Ватт үшін фотоэлектрлік модульдердің ең жоғары бағасы және жиынтық орнатылған қуат. Y логарифмдік шкаласы

1.4 суреттен көріп отырғанымыздай, кремний фотоэлектрлік модульдерінің орташа әлемдік бағасы 1976-2000 жылдар аралығында тез төмендеді. Бұл негізінен өндірістік инфрақұрылымның өсуіне және күн энергиясымен жұмыс істейтін кремнийді өңдеу процестерінің дамуына байланысты болды [20]. Соңғы бірнеше жыл ішінде масштаб әсеріне байланысты баға төмендей берді. Осыған қарамастан, күн панельдері әлі де салыстырмалы түрде қымбат және бұл бағаның жақын арада айтарлықтай төмендейтінін көрсететін белгілер жоқ. Сонымен

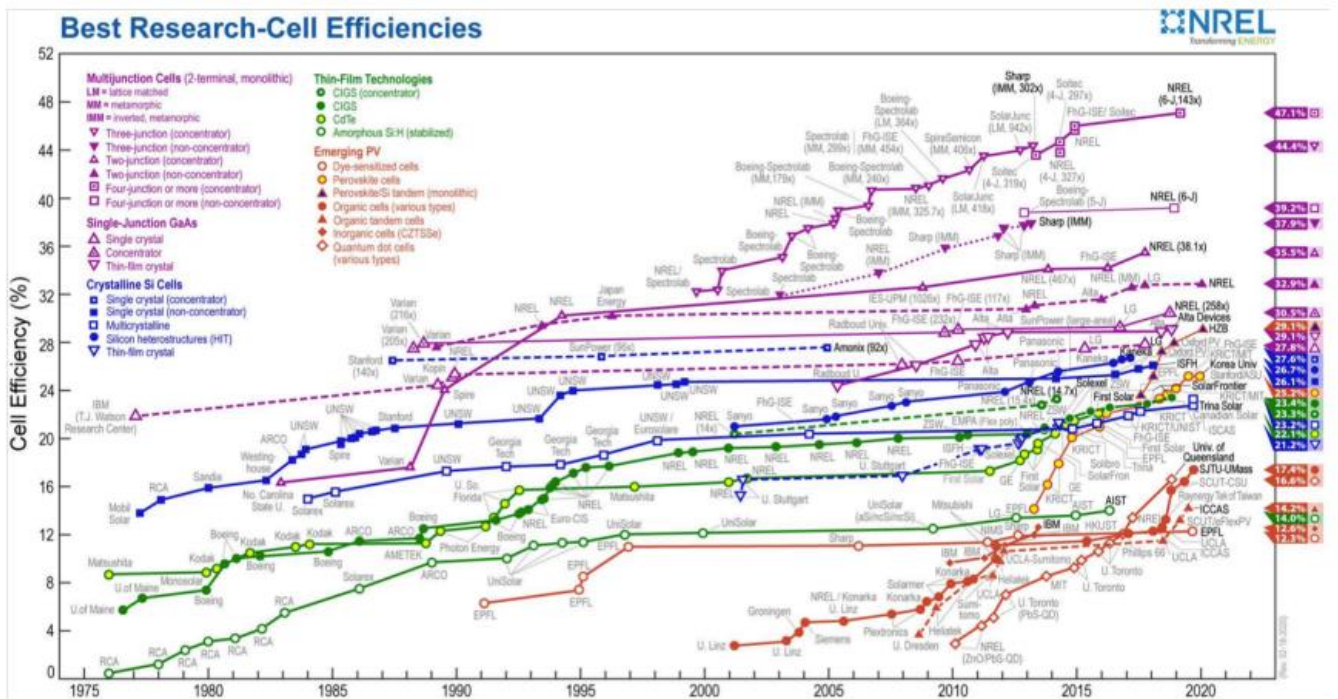
катар, кремний фотоэлектрлік модульдерінің өтелу мерзімі географиялық орналасуына байланысты айтарлықтай ерекшеленеді. Тіпті жоғары дамыған елдердегі мемлекеттік жеңілдіктердің қаржылық қолдауымен өтелу мерзімі бірнеше жылдан он жылға дейін өзгереді, өте сирек 5 жылдан төмен түседі. Фотоэлектрлік модульдердің қаржылық орындылығын арттырудың мүмкін әдістеріне қолданыстағы технологияның бағасын төмендету, фотоэлектрлік модульдердің энергияны түрлендіру тиімділігін ЭТТ арттыру немесе жаңа, арзанырақ және / немесе тиімдірек технологияға көшу жатады.

Әлемнің көптеген елдері мәлімдеген парниктік газдар шығарындыларын азайту жөніндегі халықаралық міндеттемелерді ескере отырып, фотоэлектрлік модульдерді орнатуға мемлекеттік қаржылық қолдау жақын арада бүкіл әлемде жалғасуы мүмкін. Климаттың өзгеруін азайту жөніндегі алғашқы жаһандық бастама 1992 жылы (Нью-Йорк) қабылданып, 1994 жылы күшіне енді. Біріккен Ұлттар Ұйымының Климаттың өзгеруі туралы негіздемелік конвенциясы (БҰҰКӨНК), оның негізгі мақсаты "Климаттық жүйеге қауіпті антропогендік араласудың алдын алатын деңгейде атмосферадағы парниктік газдардың концентрациясын тұрақтандыру", 2019 жылғы 20 қарашадағы жағдай бойынша 195-ке қол қойылды және БҰҰКӨНК-ның 187 тарабы ратификациялады. бұл құжат парниктік газдардың антропологиялық шығарындыларын азайтуға бүкіл әлемге ортақ ерік-жігердің алғашқы ресми халықаралық көрінісі болып табылады.

Бұл кадрлар тек сапалы болғанымен, олар Киото хаттамасын құруға негіз болды [21] 1997 жылы Тараптардың үшінші конференциясы (ТК) кезінде, сондай-ақ 2015 жылы қабылданған Париж келісімі (ПК) кезінде жиырма бірінші КС. Осы екі құжатта тараптардың жаһандық шығарындыларды қысқартуға ұлттық деңгейде айқындалатын жарналарын С жариялау процесі сипатталады және оларға қол жеткізу мерзімдері белгіленеді. БҰҰКӨНК ркико тараптары "жаһандық орташа температураның көтерілуін индустрияға дейінгі деңгейлермен салыстырғанда 2 °С-тан едәуір төмен ұстауға және температураның көтерілуін индустрияға дейінгі деңгейлермен салыстырғанда 1,5°С-қа дейін шектеуге күш салуды жалғастыруға міндеттенді, бұл климаттың өзгеру қаупі мен салдарын айтарлықтай төмендететінін анықтады. Алайда, Париж келісімі өзінің (ҰДАЖ)-ін сақтамайтын Тараптарға айыппұл салмайды, бұл климаттық дағдарыстың салдарын жеңілдетуге тек ерікті түрде үлес қосады. Осыған қарамастан, жанартылатын энергия секторына қомақты инвестициялар алдағы бірнеше онжылдықта бүкіл әлемде өсе береді деп күтілуде.

Кремний күн панельдерінің өтелу мерзімін қысқартудың тағы бір тәсілі- белгіленген бағамен олардың қарқынын арттыру: электр энергиясын өндіруді ұлғайту электр энергиясына төлемдерді үнемдеуді және сайып келгенде, бастапқы инвестицияларды тезірек өтеуді білдіреді. 1.5 суретте уақыт өте келе күн батареяларының әртүрлі түрлерінің ЭТТ өзгеруі көрсетілген. Champion кремний күн батареялары (көк түспен бөлінген) қазіргі уақытта түсетін жарықтың 26,6% электр энергиясына және 27,6% жарық хабын қосу арқылы

түрлендіруге қабілетті [22]. Көріп отырғанымыздай, соңғы бірнеше онжылдықта кремний күн батареяларының ЭТТ жоғарылауы өте баяу болды. Кремнийді өңдеу технологиясының электронды өнеркәсіптен алынғанын және жетілген екенін ескерсек, бұл таңқаларлық емес. Сонымен қатар, чемпион кремний күн батареялары Шокли-Квайссер шегіне жақындады 32,23% - да, бұл жартылай өткізгіштің 1,1V жолақ энергиясы бар тамаша бір реттік күн батареясына қол жеткізуге болатын максималды ЭТТ.



1.5 сурет - Перовскит күн элементтерінің тиімділік диаграммасы

1.5 Көп ауыспалы күн батареялары, жұқа пленкалы күн батареялары және жаңа күн технологиялары

Көп ауыспалы күн батареялары (1.5-суретте, күлгін түспен белгіленген) ден айтарлықтай асып түседі. Қазіргі әлемдік рекорд GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs белсенді қабаттарынан тұратын төрт ауыспалы күн батареясына тиесілі, ол түскен жарықтың 46% - S508 күннің шоғырланған жарығымен электр энергиясына айналдырады. [23] жұмыста сонымен қатар, шексіз қабаттары бар көп ауыспалы күн батареясына есептелген Шокли-Квайссердің теориялық шегі 1 күннің жарық қарқындылығы үшін 68,2% және 45 900 күннің қарқындылығы үшін 86,8% құрайды (бұл физикалық мүмкін болатын ең үлкен мән деп есептеледі), бұл әлі де айтарлықтай әлеует бар екенін көрсетеді заманауи технологияны жақсарту үшін. өкінішке орай, көп өтпелі күн батареяларының күрделі құрылымына байланысты оларды жасау процесі өте күрделі және қымбат. Осылайша, олардың өнімділігіне қарамастан, көп өтпелі

күн батареяларын қолдану негізінен жоғары технологиялық ғарыштық миссиялармен, әскери және күн сәулесінің әсер ететін бетінің ауданы салыстырмалы түрде аз, бірақ энергияға деген қажеттілік жоғары болған жерде шектеледі.

Бейорганикалық жұқа қабықшалар технологиясы (1.5 суретте, жасыл түспен ерекшеленеді) кремний күн батареяларымен салыстыруға болатын ККБ көрсетеді. Олардың өте жоғары сіңіру коэффициенті тиімділікке нұқсан келтірместен шикізатты (өкінішке орай сирек және улы элементтерден тұрады) үнемдеуге мүмкіндік береді. Мысалы Үндістан және галлий селенидінің (МҮГС) чемпионы күн батареясында ЭТТ 23,3% және 22,9 хабы бар және онсыз (15 күн), одан кейін кадмий теллуридін күн батареялары бар. Жұқа пленкалы бейорганикалық күн батареялары қазіргі уақытта олардың масштабталуындағы бастапқы мәселелерге қарамастан нарықта қол жетімді. [24] жұмыста алайда, өндірістің күрделілігі, сондай-ақ бастапқы материалдардың уыттылығы мен сирек кездесуі осы күн батареяларының бәсекеге қабілеттілігін шектеді. Коммерциялық әлем икемділік, жеңіл салмақ, эстетикалық құндылықтар және мөлдірлік сияқты қосымша сипаттамалары бар арзан күн энергиясын қажет етеді. Фотоэлектрлік жүйелер әлемінде осы сипаттамалардың барлығын біріктіре алатын жаңа технологиялар пайда болады (1.5 суретте, қызыл түспен белгіленген). Сенсублизацияланған күн жасушалары (СКЖ) барлық жаңа технологиялар немесе келесі буын технологиялары арасында ең жоғары рейтингке ие. Әр түрлі жолақ ені бар бояғыштардың алуан түрлілігіне байланысты СКЖ кең түс схемасында келеді. Сонымен қатар, СКЖ төмен қарқынды жарықты тиімді сіңіреді, бұл қоршаған ортаның шашыраңқы жарығын, сондай-ақ жасанды жарықты сіңіруге мүмкіндік береді, және улы емес және арзан материалдарға негізделген. Осыған байланысты олар әсіресе үй ішінде қолдану үшін қызықты. Өкінішке орай, салыстырмалы түрде төмен ЭСС (рекордтық көрсеткіш 11,9%) және соңғы бірнеше жылдағы тиімділіктің тоқырауы СКЖ коммерциялануын шектейді.

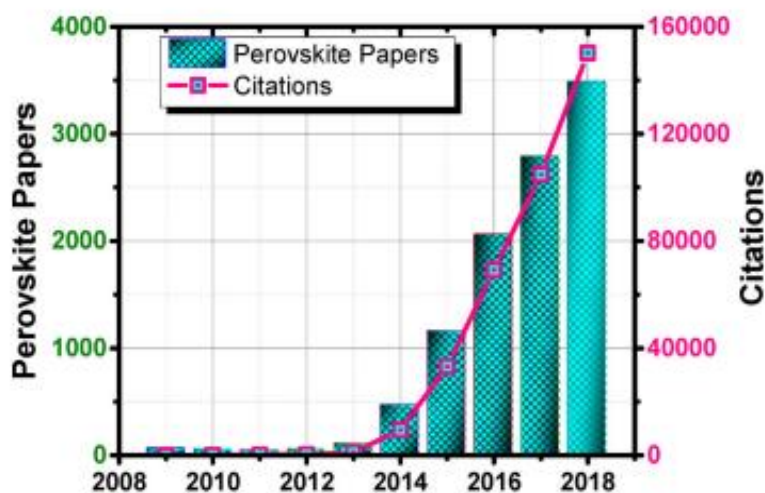
Бірнеше жыл бұрын органикалық күн батареялары мен кванттық нүктеге негізделген күн батареялары СКЖ үшін ЭТТ рекордынан асып, сәйкесінше 15,6% және 16,6% жетті. алайда олардың жетістігі соңғы бірнеше онжылдықтағы фотоэлектрлік технологиялар әлеміндегі ең үлкен жетістік – перовскиттің фотоактивті материалының ашылуымен көлеңкеде қалды.

1.5.1 Перовскитті күн батареяларының пайда болуы

Жаңа күн технологиясының баяу ілгерілеуі 2009 жылы Кожима және т. б. СКЖ-те бояғышты ауыстыру ретінде $CH_3NH_3PbI_3$ нанобөлшектерін пайдалануда 3,81% тиімділігі туралы хабарланған кезде күрт бұзылды. бұл технология "перовскит" деп аталды және келесі бірнеше жыл ішінде ЭТТ перовскит күн батареяларының ПҚЭ жылдам өсуі ғылыми әлемнің назарын тез аударды (сурет. 1.5 қызыл түспен белгіленген). 2013 жылы Science және Nature

екеуі де ПКЭ-ті жылдың ең жақсы он жетістігінің бірі деп жариялады. бұл осы саладағы ғылыми еңбектер мен дәйексөздердің экспоненциалды өсуіне ықпал етті, содан кейін перовскит күн батареяларының тиімділігінің үлкен өсуі байқалды (сурет. 1.6). Бүгінгі күнге дейін ең тиімді ПКЭ түрлендіреді >25% түсетін жарықты тегіс құрылымдағы электр энергиясына және 28% [25] тандемдік конфигурацияда кремний күн батареясымен біріктіреді

Дүние жүзіндегі компаниялардың аз бөлігі жақын арада ПКЭ коммерцияландыру бойынша міндеттемелерді өз мойнына алды, қазіргі көшбасшы Microquanta ЭТТ сертификатталған 17,9% перовскиттен шағын Модульдер шығарады. дегенмен, технологияны одан әрі дамытудың шұғыл қажеттілігі әлі де бар. Атап айтқанда, перовскит күн батареяларының ұзақ мерзімді тұрақтылығы (қызмет ету мерзімі) проблема болып табылады. Сонымен қатар, перовскит материалының кейбір ішкі механизмдері әлі толық түсінілмеген (мысалы гистерезистің пайда болуы.) Сонымен қатар, интерфейсті дамыту, сондай-ақ беттік тұзақ күйлерінің пассивациясы ПКЭ өнімділігінде үлкен рөл атқаратын сияқты және оларға назар аудару қажет. Перовскитті тұндырудың масштабталатын әдістерін әзірлеу және оңтайландыру да маңызды. Сонымен қатар, ПКЭ тиімділігі құрылғының әртүрлі архитектураларын, мысалы, ең тиімді кремний күн батареяларында қолданылатын түрлендіреді кері байланыс (КБ) конфигурациясын қарастыру арқылы одан әрі жетілдірілуі мүмкін.

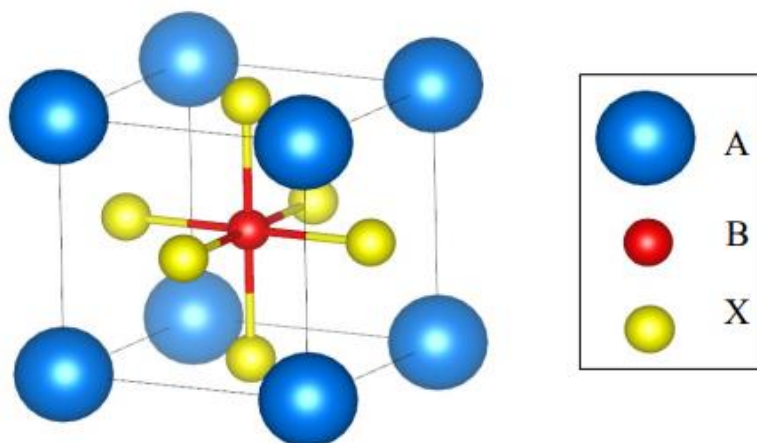


1.6 сурет - 2009-2018 жылдардағы перовскит күн батареялары саласындағы ғылыми жұмыстар мен дәйексөздер саны (дереккөз: Web of Science, Clearwater Analytics, 3 наурыз 2019 ж.)

2. Негізгі бөлім

2.1 Перовскит материалының қасиеттері

"Перовскит" термині ABX_3 кристалдық құрылымы бар материалдар тобына жатады. Бұл құрылымды алғаш рет 1839 жылы Густав Роза кальций титан оксидінде байқады, кейінірек орыс минералогы Лев Алексеевич Фон Перовский сипаттады, ол өз атауын мұра етті. Перовскит кристалында үлкен а катионы текше құрылымының бұрышын алады $(0,0,0)$, ал кіші В катионы X $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ октаэдрлік аниондармен қоршалған дененің центрінде $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ орналасқан (2.1 сурет)



2.1 сурет - Перовскиттің кристалдық құрылымы ABX_3 . А және В катиондарды білдіреді, С анионды білдіреді

Тұрақты перовскит кристалын жасау үшін Голдсмиттің төзімділігі мен октаэдрлік коэффициентін ескеру өте маңызды. голдшмидттің төзімділік коэффициенті идеалдандырылған қатты сфералық модельдегі А – X және В – X арақашықтықтарының қатынасы ретінде анықталады. Ле және басқалар ұсынған октаэдрлік коэффициент, толеранттылық коэффициентін толықтырады және В катионының радиустарының X анионының радиустарына қатынасы ретінде анықталады:

$$t = \frac{R_A + R_B}{\sqrt{2}(R_B + R_X)} \quad (2.1)$$

$$\mu = \frac{R_B}{R_X} \quad (2.2)$$

мұндағы R_A және R_B - сәйкес катиондардың иондық радиустары, ал R_B -анионның иондық радиусы

Төзімділік пен октаэдрлік коэффициенттер кристалды компоненттерді таңдауға байланысты перовскиттің әртүрлі түрлері үшін ерекшеленеді. Бұл

бірлік ұяшықтың пішініне әсер етеді. $Rm3m$ кеңістіктік тобына сәйкес келетін текше құрылым (2.1 сурет), ең алдымен, for $t = 0,89 - 1,0$, ал тетрагональды немесе орторомбты құрылымдар төменгі t -да және алтыбұрышты құрылымдар Жоғары t -да пайда болады. перовскит галогенидтері үшін октаэдрлік коэффициент $0,442$ мен $0,895$ мм аралығында болады.

Толеранттылық пен октаэдрлік коэффициенттер перовскиттің қалыптасуына сілтеме ретінде қызмет етеді, дегенмен жоғарыда аталған мәндер қажетті симметрияға жету үшін қажетті, бірақ жеткіліксіз шартты сипаттайды. Негізгі, кристалдық шекаралар мен ақаулар және тотығу-тотықсыздану ортасы сияқты басқа жағдайлар перовскит материалының кристалдық құрылымына әсер етуі мүмкін.

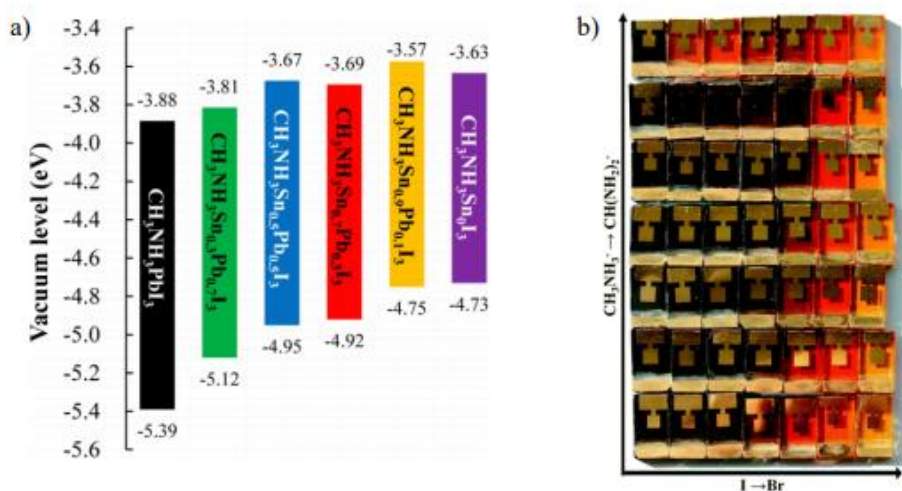
Температура перовскит материалының құрылымдық қасиеттеріне үлкен әсер етеді. Мысалы, метиламмоний қорғасын йодидінің ($MAPbI_3$) бірлік жасушалары (барлық перовскит материалдарының ішіндегі ең зерттелгені) тетрагональды құрылымнан (бөлме температурасында бар) текшеге ($\sim 54^\circ\text{C}$ -тан жоғары) немесе орторомбиялық құрылымға ($\sim -111^\circ\text{C}$ -тан төмен) фазалық ауысуларға ұшырайды. бұл перовскиттің бірлік ұяшығының ішіндегі MA^+ катионының оның $C-N$ осінің айналасында айналуынан туындайды, жоғары температурада жылдамырақ қозғалыс болады. сонымен қатар, Генг жасаған алғашқы принциптер бойынша есептеулер және т.б. MA^+ молекуласы $C-N$ осінің бағытын әр түрлі температурада өзгертеді, бұл $Pb-I$ байланысының ұзындығына және $Pb-I-Pb$ бұрышына, демек, материалдың тұрақтылығы мен электронды қасиеттеріне әсер етеді. бұл құрылымдық өзгерістер барлық перовскит материалдары үшін өте әртүрлі, ерекше температурада көрінеді.

ПКЭ-де ең көп қолданылатын а катиондары: метиламмоний $CH_3NH_3^+$ (MA^+) $R = 1,8 \text{ \AA}$, формаидиний $CH(NH_2)_2^+$ (FA^+) $R = 1,9-2,2 \text{ \AA}$ және цезий (CS^+) $R = 1,65 \text{ \AA}$ немесе осы үшеуінің қоспасы. В катионы металл катионы, әдетте қорғасын (Pb^{2+}) болып табылады, дегенмен оны қалайымен (Sn^{2+}) ауыстыруға көп күш Жұмсалады уыттылық себептеріне байланысты (сәйкесінше $R = 1,19 \text{ \AA}$ және $R = 1,1 \text{ \AA}$). Х анионы әдетте $R = 2,20 \text{ \AA}$ йодтан (I^-) және $R = 1,96 \text{ \AA}$ бромнан (Br^-) немесе $R = 1,81 \text{ \AA}$ хлордан (Cl^-) тұратын аралас галогенді материал болып табылады[26].

Жоғарыда аталған компоненттерді араластыру перовскит кристалының пішініне ғана емес, сонымен қатар материалдың электронды қасиеттеріне де әсер етеді. В-Х байланыс ұзындығы мен В-Х-В байланыс бұрышының өзгеруі осы перовскиттердің жолақ зонаы $1,1$ -ден $2,3$ эВ аралығында реттеуге мүмкіндік береді, ал үлкен октаэдрлер мен үлкен байланыс бұрыштары үшін жолақ ені аз болады. х компонентінің электртерістігінің жоғарылауы В-Х байланысының валенттілігінің жоғарылауына әкеліп соқтырады, бұл кең жолақ аймағына әкеледі. көптеген зерттеулерде байқалғандай, катионды таңдау сонымен қатар перовскиттің тыйым салынған аймағына әсер етеді, үлкен молекулалар жолақ Өлшемін азайтады және осылайша сіңіру спектрлерін қызыл түске ауыстырады. алғашқы принципті модельдеу болғанымен, Amat et al. $APbI_3$ материалдар тобы А катионының кристалдық тордағы басқа атомдармен Н-І сутегі байланыстары

арқылы әрекеттесуі материалдың энергетикалық аймақтарын қалыптастыруда бірдей маңызды рөл атқаратынын көрсетеді.

Реттелетін сіңіру спектрі айқын сіңіру жиегімен бірге перовскитті фотоэлектрлік материалдардың ең үлкен артықшылықтарының бірі болып табылады. Осы қасиеттердің арқасында перовскиттер перовскит-перовскит тандемі SCs [27] жұмыста немесе кремний SCs түрінде тандемді күн элементтері (КЭ) қолдануды тапты, бұл олардың тиімділігін одан әрі арттырады. сонымен қатар, жолақ параметрі перовскит күн батареяларының эстетикасына әсер етеді. Көптеген зерттеулерде көрсетілгендей, перовскит материалдарындағы әртүрлі катиондар мен аниондардың арақатынасын өзгерту көрінетін спектрдің барлық дерлік түстерінің пленкаларын қолдануға мүмкіндік береді. құрамның өзгеруінен туындаған жолақ параметрінің мысалын энергетикалық диаграммадағы (а) 2.2 - суретте және әртүрлі құрамдағы (б) перовскиттерден жасалған күн батареяларының әртүрлі түстерінің матрицасы ретінде байқауға болады. Тыйым салынған аймақтың енінің өзгеруі перовскит материалының түсінде көрінеді.



2.2 сурет - Перовскит материалының құрамының өзгеруіне байланысты оның тыйым салынған аймағының өзгеруі: (а) қалайы концентрациясын арттыру арқылы жолақ зоны 1,51 эВ-ден 1,10 эВ-ге дейін реттеу, (б) APbX_3 Перовскиттеріндегі әртүрлі I және Br коэффициенттерімен араласқан MA^+ және FA^+ катиондарының әртүрлі қатынастарының матрицасы

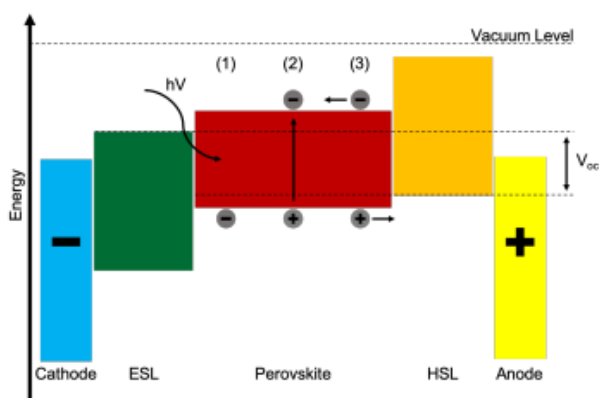
2.2 Перовскит күн батареяларының жұмыс принципі

Құрылғыдағы перовскит қабатының рөлі түскен жарықты сіңіру және оны бос заряд тасымалдаушыларға (электрондар мен тесіктер) айналдыру болып табылады. Кейіннен зарядтар перовскиттен алынып, электродтарға тасымалдануы керек. Тасымалдаушыларды алу перовскит материалының ішінде

пайда болатын ішкі электр өрісінің арқасында жүреді. Бұл өріс екі таңдамалы зарядты қабаттарды қосу және саңылау түйінін (кәдімгі КЭ) немесе түйреуіш түйінін (төңкерілген КЭ) жасау арқылы индукцияланады. Бұл электрондар мен тесіктердің сәйкес электродтарға қарама-қарсы бағытта қозғалуына қозғаушы күш жасайды. Перовскит материалындағы заряд тасымалдаушылардың орташа өмір сүру уақыты шамамен жүздеген наносекундты құрайды, сондықтан рекомбинацияны болдырмау үшін заряд тасымалдаушыларды алу процесі әлдеқайда жылдам болуы керек.

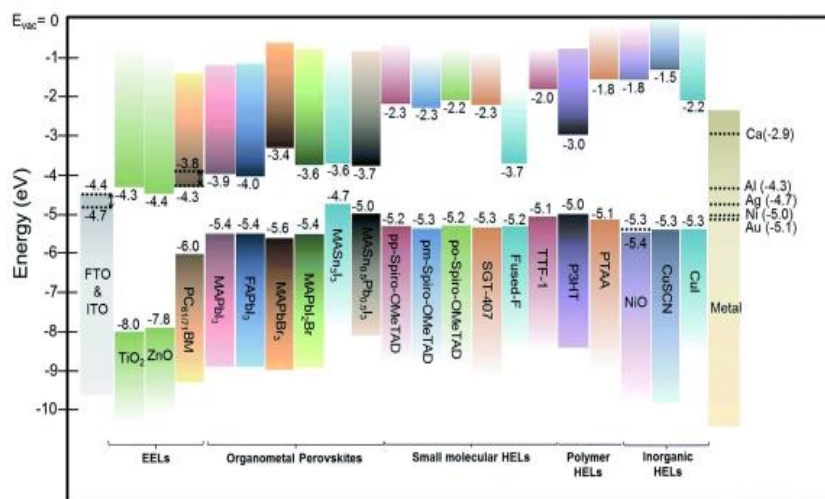
2.2.1 Энергетикалық диаграмма

Перовскит күн батареяларының жұмыс принципін суретте көрсетілген энергетикалық диаграммамен түсіндіруге болады. 2.3-суретте түскен фотон перовскитті фотоактивті материалмен жұтылады. Фотон энергиясы валенттік аймағынан өткізгіш аймаққа электронды қоздыру үшін қолданылады. Электрон артында тесік қалдырады. Перовскит материалының жолақ ені сіңірілуі мүмкін фотондардың ең аз энергиясын анықтайды, $CH_3NH_3PbI_3$ үшін ең аз $\sim 1,50-1,55$ эВ қажет. қозған электрон Электрон-тандау қабат (ЭТҚ) бағытында, төменгі энергия күйіне қарай жылжиды және ақырында катодқа жетеді. Сонымен қатар, саңылауларға арналған селективті қабат жүйесі (ССҚЖ) бағытында жоғары энергетикалық күйге ауысады және ақырында анодқа жетеді. Перовскит материалының өткізгіш жолағы мен ЭТҚ арасындағы энергия айырмашылығы электрондарды алу үшін қозғаушы күш жасайды. Сол сияқты, перовскит материалының валенттік аймағы мен ССҚЖ арасындағы энергия айырмашылығы тесіктерді алу үшін қозғаушы күш жасайды. Сонымен қатар ССҚЖ деңгейі мен ЭТҚ деңгейі арасындағы айырмашылық құрылғы қабылдай алатын ашық тізбектің максималды кернеуін анықтайды.



2.3 сурет - Құрылғының жұмыс принципін көрсететін перовскит күн батареясының энергетикалық диаграммасы: перовскит қабатында жасалған бос зарядтар зарядқа таңдамалы тиісті қабаттармен алынады және электродтарға жіберіледі

Осы уақытқа дейін көптеген органикалық және бейорганикалық материалдардың қасиеттері зарядты таңдамалы қабаттарда қолдану үшін зерттелді. Олардың барлығы әртүрлі құрылғы архитектураларында және перовскит материалының әртүрлі түрлерімен үйлеседі. 2.4 суретте әдеттегі перовскиттермен және жиі қолданылатын электродтардың жұмыс функцияларымен бірге зарядқа таңдамалы ең көп қолданылатын қабаттардың энергетикалық диаграммасы көрсетілген.



2.4 сурет - Әдеттегі перовскиттердің, зарядқа таңдамалы материалдардың және электродтардың энергетикалық диаграммасы (нүктелі сызықтар функцияның жұмысын білдіреді). Қайта басылған: корольдік химиялық қоғамның рұқсатымен

2.2.2 Электрондық селективті қабаттар

Жоғарыда айтылғандай, ЭТҚ рөлі перовскит материалынан электрондарды алу және оларды катодқа тасымалдау болып табылады. Сонымен қатар, ЭТҚ тесіктер үшін буферлік қабат ретінде жұмыс істейді, олардың катодқа баратын жолын жауып, осылайша рекомбинацияны басады.

ПКЭ-де ең көп қолданылатын ЭТҚ-дің бірі- TiO_2 . Бұл оның көптеген фотоактивті перовскит материалдарымен аймақтардың жақсы үйлесуіне, жоғары мөлдірлікке және электрондардың ұзақ өмір сүруіне байланысты. Ең тиімді перовскитті күн батареяларында әдетте титанның ақтам және мезопоралық қабаттарының қоспасы болады. Бұл комбинация катодты тесіктердің рекомбинациясына жол бермейтін саңылаусыз буферді және сонымен бірге электрондардың экстракциясын күшейту үшін перовскит қабатына енетін жанасу бетінің максималды ауданын қамтамасыз етеді. TiO_2 мезопорозды қабатын экранды басып шығару арқылы қолдануға болады, бұл процесс СКЖ

үшін жақсы жасалған. TiO_2 слойам қабаты әдетте жақсы және қайталанатын қабат сапасына, сондай-ақ процестің қарапайымдылығына байланысты пиролиз бүріккіш әдісімен қолданылады. Бұл тұндыру әдістерінің екеуі де жоғары температурада 500°C дейін күйдіру кезеңін қажет етеді, бұл, өкінішке орай, көптеген икемді субстраттардың балку температурасынан асып түседі, бұл құрылғының қолдану аясын шектейді. Титанды тұндырудың төмен температуралы әдістерін қолдану (мысалы титан изопророксиді мен судан атомдық қабатын қолдану (АҚК) немесе ультракүлгін сәулелену арқылы сығу әдетте қабаттың сапасына, демек, құрылғының тиімділігіне қатыстыромаға келуді қажет етеді. Сонымен қатар, АҚК сияқты, бұл құрылғыны дайындау уақытын едәуір арттырады және жоғары вакуумды қажет етеді.

ZnO және SnO_2 сияқты электрондарға таңдамалы басқа бейорганикалық материалдар төмен температуралы жауын-шашын процестерінің (мысалы, тұрақты ток бүрку, басып шығару, айналдыру жабыны) және қолайлы тыйым салынған аймақтардың арқасында біртіндеп танымал бола бастады. Титанмен салыстырғанда ZnO электрондардың әлдеқайда жоғары қозғалғыштығымен сипатталады. Дегенмен, зерттеулер ZnO күн батареясының термиялық деградациясына ықпал ететінін көрсетеді. SnO_2 қолданатын құрылғылар қатты гистерезистен жиі зардап шегеді. [29] жұмыста бүгінгі күнге дейін SnO_2 және ZnO көмегімен алынған ең үлкен тиімділік $\sim 21\%$ және $\sim 16\%$ тиісінше.

Төңкерілген құрылымда қолданылатын ең танымал органикалық ЭТҚ-метил эфири – фенил С61 май қышқылы, төмен температурада, ерітіндіден тұндыру процесінде және 20% - дан жоғары тиімділікте ерекшеленеді. Алайда, бұл ЭТҚ перовскиттің астыңғы қабатының толық жабылмауынан туындаған жоғары радиациясыз рекомбинациямен танымал бұл мәселені жеңілдету үшін ЭТҚ қабатын термиялық буланған литий фторидімен және C_2 /батокупроинмен(batocuprione) нығайтуға болады, тек құнын ғана емес, сонымен қатар құрылғыны жасау процесін қиындатады.

2.2.3 Саңылауларға таңдамалы қабаттар

ССҚЖ перовскит материалынан тесіктерді алып, оларды анодқа тасымалдайды, сонымен бірге электрондардың осы бағытта қозғалуына жол бермейді.

ПКЭ-де қолданылатын ең көп таралған ССҚЖ-2,2',7,7'-тетракис-(N,N di-p – метоксифенил-амин) 9,9'-спиробифлуорен (Спиро-ОМеТАД), алғаш рет қатты күйдегі СКЖ-де ССҚЖ ретінде қолданылған. қазіргі уақытта Спиро-ОМеТАД әртүрлі нұсқалары бар. оның электронды қасиеттерін жақсарту үшін екі метоксидті алмастыратын элементтердің орнын өзгерту арқылы синтезделеді. Спиро-ОМеТАД қолданудың стандартты әдісі, әдетте, хлорбензол ерітіндісінен 4-терт-бутилпиридин (ТВР) және литий-бис (трифторметансульфонил)имидид (ЛБТИ) қоспалары бар сығымдау әдісін қолдануды қамтиды. Қоспалар Спиро-ОМеТАД электр өткізгіштігін арттырады, дегенмен зерттеулер ЛБТИ

гигроскопиялық және ПКЭ ұзақ мерзімді тұрақтылығына зиянды екенін көрсетеді.

Органикалық Полимерлі материалдар ПКЭ-де ССҚЖ ретінде кеңінен қолданылады. Политриариламин (ПТА) чемпионның алдыңғы перовскит жасушасының саңылауларына селективті қабат ретінде қолданылды. қабат әдетте Перовскиттің үстіне және ТВР қосылған толуол ерітіндісінде айналдыру әдісімен қолданылады. Басқа полимер, поли (3,4 этилендиокситиофен) - поли(стиролсульфонат) (ПЭС), төңкерілген құрылымда кеңінен қолданылады. Оны басқа әдістермен қатар Мөлдір өткізгіш оксидпен қапталған шыны немесе пластик субстратқа айналдыру [30] жұмыста немесе басып шығару арқылы қолдануға болады. ПЭС және оның туындылары әсіресе ауқымды икемді ПКЭ үшін қызықты. Бұл оның төмен температурасына және масштабталатын қолдану әдістеріне, сондай-ақ крекингке жақсы төзімділігіне байланысты. сонымен қатар, Снайт және басқалар қабатын қолдану әдісін ойлап тапты: перовскит материалының (ПМ) үстіне тікелей, дұрыс (инверттелмеген) ПКЭ жасайды.

ССҚЖ ретінде қолдануға арналған бейорганикалық материалдардың кең ауқымы зерттелді. Олар әсіресе КБ ПКЭ үшін өте қызықты, өйткені оның селективті тұндыру әдістері жақсы дамыған. Бұл дегеніміз, ССҚЖ электродтардың бірінің үстіне таңдамалы түрде қолданылуы мүмкін, тіпті егер КБ электродтарының екеуі де субстратта болса да. Мысал ретінде, CuSCN-ді Chappaz-Gillot және басқалар жасаған әдіспен электродқа қосуға болады. салыстыру электродымен салыстырғанда теріс зарядталған электродтың үстіне. Сонымен қатар, NiO және Cu_2O сияқты металл оксидтерін алдын ала қолданылатын металл электродының термиялық тотығуы арқылы жасауға болады, нәтижесінде ұқсас әсер пайда болады, Бейорганикалық ССҚЖ жоғары химиялық тұрақтылықпен, жоғары тесік қозғалғыштығымен және арзан бағамен сипатталады. Өкінішке орай, Бейорганикалық ССҚЖ-дің ешқайсысы олардың органикалық эквиваленттерін пайдалану арқылы алынған тиімділіктің жоғарылауына әкелген жоқ.

2.2.4 Электродтар

ПЭК-дегі электродтардың рөлі зарядқа таңдамалы қабаттардан зарядтарды жинау және оларды торға тасымалдау болып табылады. ПКЭ жалпақ архитектурасы фотондардың перовскит материалына жетуіне мүмкіндік беру үшін электродтардың кем дегенде біреуі мөлдір болуын талап етеді. Сондықтан ПКЭ саласында индий-қалайы оксиді (ИҚО) және фтормен легирленген қалайы оксиді (ФҚО) сияқты мөлдір өткізгіш оксидтер (МӨО) кеңінен қолданылады. Сатылымда екі жабыны бар шыны және пластикалық субстраттардың әртүрлі түрлері мен модельдері бар.

Артқы (міндетті түрде мөлдір емес) электрод әдетте алтыннан, күмістен, алюминийден, никельден немесе мыстан жасалған. Бұл электродтар әдетте бу тұндырудың физикалық әдістері арқылы қолданылады. Перовскит

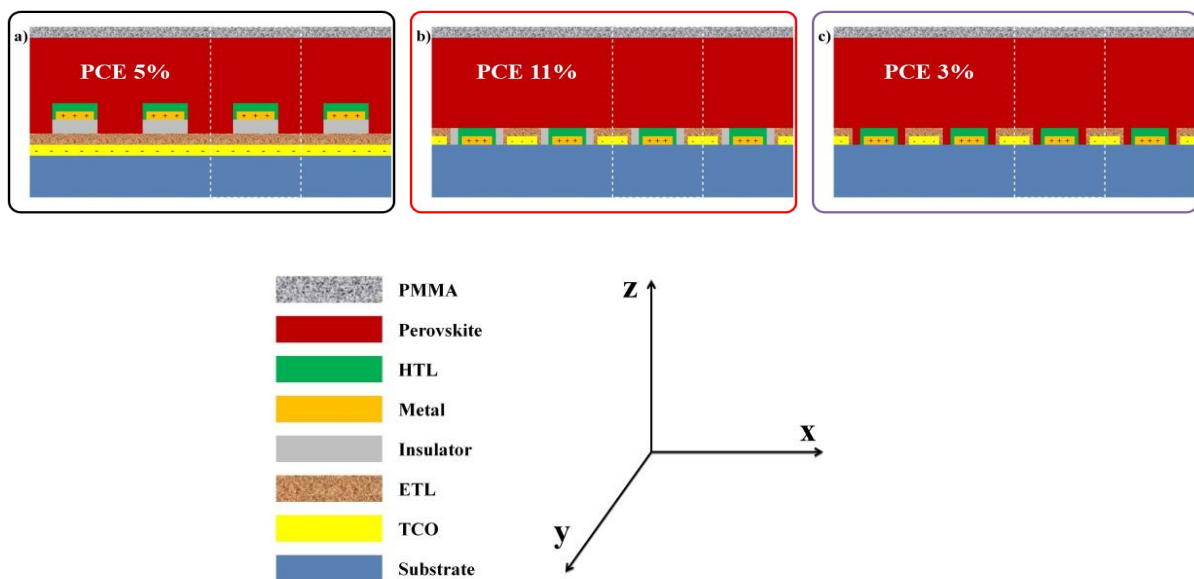
құрылғысының тиімділігі мен тұрақтылығы бойынша ең жақсы нәтижелерге алтынның көмегімен қол жеткізіледі; құрылғының құны маңызды рөл атқарған кезде басқа материалдар қолданылады.

3. Нәтиже және талқылау

3.1 суретте КБКК ПКЭ схемалық дизайны көрсетілген. Бұл конструкцияда КБ-ПКЭ микроқұрылымды анодтық қабаты (металл контактілері (олардың НТЛ-мен «+» деп белгіленеді)) үздіксіз катодты қабаттың (металл қабаты («-» ретінде белгіленеді), оның ЕТЛ-мен) үстінде орналасқан және жұқа оқшаулағыш қабатпен бөлінген. Демек, анод пен катод қабаттары бір жазықтықта болмайды. Перовскит қабаты мен катодты қабат арасындағы байланыс микроқұрылымды анодты қабат арасындағы саңылаулар арқылы жүзеге асады. 3.1 суретте ЖБКК ПКЭ схемалық дизайнын көрсетеді. Бұл конструкцияда интержиирленген анод пен катод қабаттары бір жазықтықта орналасқан және бір-бірінен оқшаулағыш саңылау қабаттарымен бөлінген. Мұнда перовскит қабатының үстіңгі жағы да, төменгі жағы да ЖБКК ЭТТ-нің тегіс беткейіне байланысты тегіс. Бұл перовскит қабатының төменгі интерфейсі КБКК ЭТТ құрылымдық бетінің арқасында құрылымдалған КБКК дизайнынан мүлде ерекшеленеді. 3.1 суретте БКК ПКЭ схемалық дизайнын көрсетеді. Бұл конструкцияда аралық анод пен катод қабаттары да бір жазықтықта болады; алайда көршілес анод пен катодты қондырғылар арасындағы бос орындар оқшаулағыш материалмен толтырылмайды. Осылайша, БКК дизайнымен ЭТТ беті тегіс емес, бұл оны КБКК және FIBC конструкциялары арасындағы гибридті етеді.

КБКК ПКЭ бірінші эксперименттік демонстрациясын Жұмабеков және т.б. 2016 жылы [4] жұмыста, бұл сонымен қатар кері байланыс архитектурасы бар ПКЭ-ның алғашқы үлгісі болып табылады. Қазіргі уақытта КБ-ПКЭ үшін бұл дизайн эксперименталды және теориялық бірнеше зерттеу топтарымен аздықөпті егжей-тегжейлі зерттелді. КБКК ПКЭ үшін ЭТТ өндірісі жоғарғы анод қабаты үшін микрофабрикацияны қажет етеді, ол катодты қабаты бар субстраттарда бір сатылы литография процесін қамтиды, содан кейін анод қабатын вакуумды тұндыру арқылы электродтарды кейіннен көтеру және күйдіру. Содан кейін перовскит қабаты құрылғыны дайындауды аяқтау үшін ерітіндімен өңделген тұндыру әдістерімен тұндырылады. КБКК ПКЭ үшін ең жоғары хабарланған ЭТТ мәні бүгінгі күнге дейін шамамен 11 % құрайды. Дегенмен, алдыңғы баяндамамызда біз КБКК ПКЭ және сэндвич құрылымды жазық ПКЭ құрылғыларының физикасына, мінез-құлқына және өнімділігіне егжей-тегжейлі салыстырмалы талдау жасадық. Жиі қолданылатын стандартты дрейф-диффузия үлгісін және құрылғылардың нақты оптикалық реакциясын есептеу арқылы біз КБКК ПКЭ үшін ЭТТ мәндерін 25,5 % жоғары алуға болатынын көрсеттік. Мұнда ЕТЛ қабаты ретінде SnO_2 немесе TiO_2 таңдалды, ал НТЛ қабаты ретінде CuO_2 таңдалды. Сәйкес сэндвич құрылымды жазық ЭТТ шамамен 22 % шамасында ПКЭ мәнін көрсетті, бұл КБКК ПКЭ үшін қарағанда айтарлықтай аз (~10%). Осыған ұқсас нәтижелерді Yang және басқалар [13] сәйкесінше ЕТЛ және НТЛ қабаттары ретінде SnO_2 және NiO бар ПКЭ үшін хабарлады. Сонымен қатар, сол есепте авторлар шағылысуға қарсы жабынды қолдану және фотонды қайта өңдеу процесін есепке алу арқылы КБКК ПКЭ ЭТТ мәндерін 29,9 % дейін арттыруға болатынын көрсетеді.

Жақында Song және т.б. ЖБКК ПКЭ эксперименттік демонстрациясын хабарлады. [31] жұмыста онда аралық катод (олардың ETL-мен алтын контактілері) және анод (тек алтын контактілер) перовскит фото-жұтқыш қабатының алдын ала синтезделген монокристалына тікелей қойылды. Мұнда құрылғыларда жартылай өткізгіш-жартылай өткізгіш (ETL/перовскит) және жартылай өткізгіш-металл (перовскит/Au) қосылыстары болады. ЖБКК ПКЭ құрылғыларымен алынған және Song және т.б. есептеген ең жоғары ЭТТ мәні. [31] жұмыста да шамамен 11% құрайды. Дегенмен, теориялық зерттеулер Ma және т.б. [32] тиісінше ETL және HTL қабаттары ретінде TiO_2 және NiO бар ЖБКК ПКЭ үшін ЭТТ мәндерін шамамен 22,7 % болжайды. Ma және т.б. табылған мәліметтерге сәйкес, сәйкес сэндвич құрылымды жазық ПКЭ-тердің ЭТТ мәндері. [32], бар болғаны 19,9% шамасында. Осылайша, ЖБКК ПКЭ ЭТТ сэндвич құрылымды жазық ПКЭ ЭТТ қарағанда ~1,14 есе жоғары болуы мүмкін. БКК ПКЭ бірінші эксперименттік демонстрациясы туралы Razos-Outon және т.б., 2016 жылы хабарлады [33]. Қазіргі уақытта БКК ПКЭ-де тіркелген ең жоғары PCE мәні шамамен 3% құрайды. Бүгінгі күні БКК ПКЭ және сэндвич архитектурасы ПКЭ үшін салыстырмалы зерттеу туралы хабарланбаған. Дегенмен, БКК және ЖБКК ПКЭ үшін ұқсас нәтижелер КБ ПКЭ-тер оптикалық қасиеттері бойынша сэндвич құрылымды жазық құрылғылардан жоғары екенін ескере отырып мүмкін болады деп болжауға болады.



2.1 сурет - Квази-біріктірілген кері контактты КБКК жазық-біріктірілген кері контактты және біріктірілген кері контактты БКК құрылғыларының көлденең қимасының эскизі көрсетілген

3.1 Оптикалық модельдеу. Пойтинг векторы

Фотоактивті қабат зарядтың екі жазық тасымалдаушы қабаттары арасында қысылған қарапайым ПКЭ-де зарядтардың тасымалын бір өлшемді (1D) модельмен модельдеуге болады. Сәйкесінше, фотоактивті қабаттағы $G(x, y, z)$ заряд тасымалдаушыларының генерация жылдамдығын алу үшін Ламберт Бирдің оптикалық сіңірілуінің қарапайым жуықтауын қолдану жеткілікті. Заряд тасымалдаушылардың генерация жылдамдығының 2D профильдерін есептеу үшін Ламберт-Бирдің қарапайым моделін қолдану дұрыс емес, өйткені бұл модель құрылғының фотоактивті қабатында болатын оптикалық процестерді (шағылысулар мен резонанстар) ескермейді. Сондықтан, 2D немесе 3D жүйелерін қарастырған кезде генерацияның нақты профильдерін алу үшін күрделі электромагниттік есептеулер жүргізу қажет. Ол үшін біз Li және т.б жасаған модель қолданылды, онда кеңістікке және толқын ұзындығына тәуелді заряд тасымалдаушылардың генерация жылдамдығы келесі қатынаспен алынады:

$$G(x, y, z, \lambda) = \alpha(x, y, z, \lambda)\varphi(\lambda)P_s(x, y, z, \lambda) \quad (3.1)$$

Мұндағы $\alpha(x, y, z, \lambda)$ - абсорбция коэффициенті болып табылады және $\varphi(\lambda)$ - күнге түсетін фотондар ағыны және $P_s(x, y, z, \lambda)$ - бұл қуат ағыны. Кеңістіктік тәуелділік модель заряд генерациясының жылдамдығын әрбір қабаттың оптикалық қасиеттерін есепке ала отырып, барлық құрылғы үшін есептей алатындығын көрсетеді. $P_s(x, y, z, \lambda)$ келесі қатынастар бойынша есептеледі:

$$P_s(x, y, z, \lambda) = \sqrt{|P_{ox}(x, y, z, \lambda)|^2 + |P_{oy}(x, y, z, \lambda)|^2 + |P_{oz}(x, y, z, \lambda)|^2} \quad (3.2)$$

мұндағы:

$$P_{ox}(x, y, z, \lambda) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E_y H_z^* + E_z H_y^*) \quad (3.3)$$

$$P_{oy}(x, y, z, \lambda) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E_z H_x^* + E_x H_z^*) \quad (3.4)$$

$$P_{oz}(x, y, z, \lambda) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E_x H_y^* + E_y H_x^*) \quad (3.5)$$

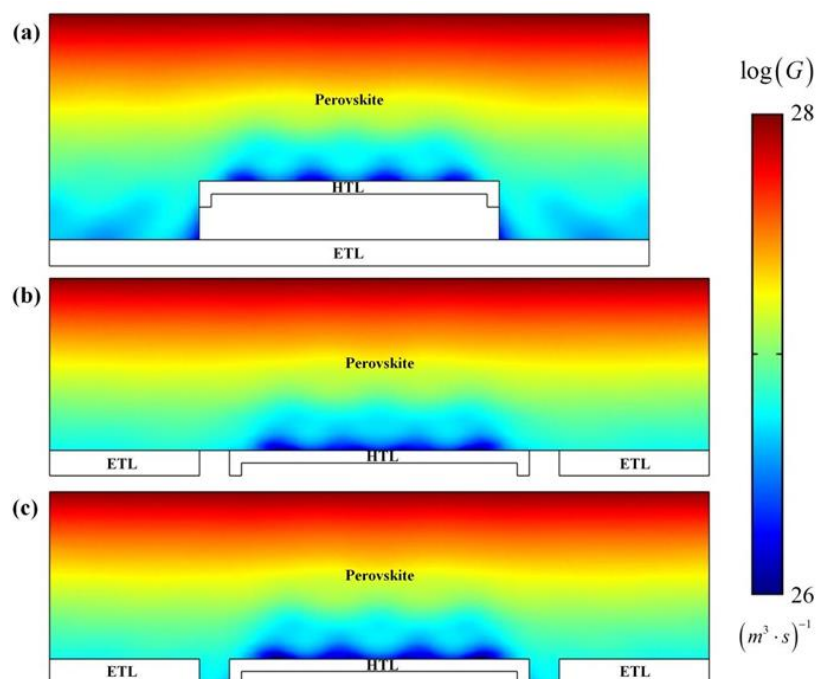
мұнда E және H түсетін жарық тудыратын кеңістіктік және жиілікке тәуелді электр және магнит өрістерін білдіреді. "Re" және "*" таңбалары сәйкесінше нақты бөлік пен жорамал бөліктерін белгілеу үшін қолданылатын операторлар болып табылады. Перовскиттің (біздің жағдайда бұл MAPbI₃) фотоактивті қабаты

тасымалдаушыларының кеңістікке тәуелді генерация жылдамдығының картасы келесі тәуелділікпен есептеледі:

$$G(x, y, z, \lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(x, y, z, \lambda) d\lambda \quad (3.6)$$

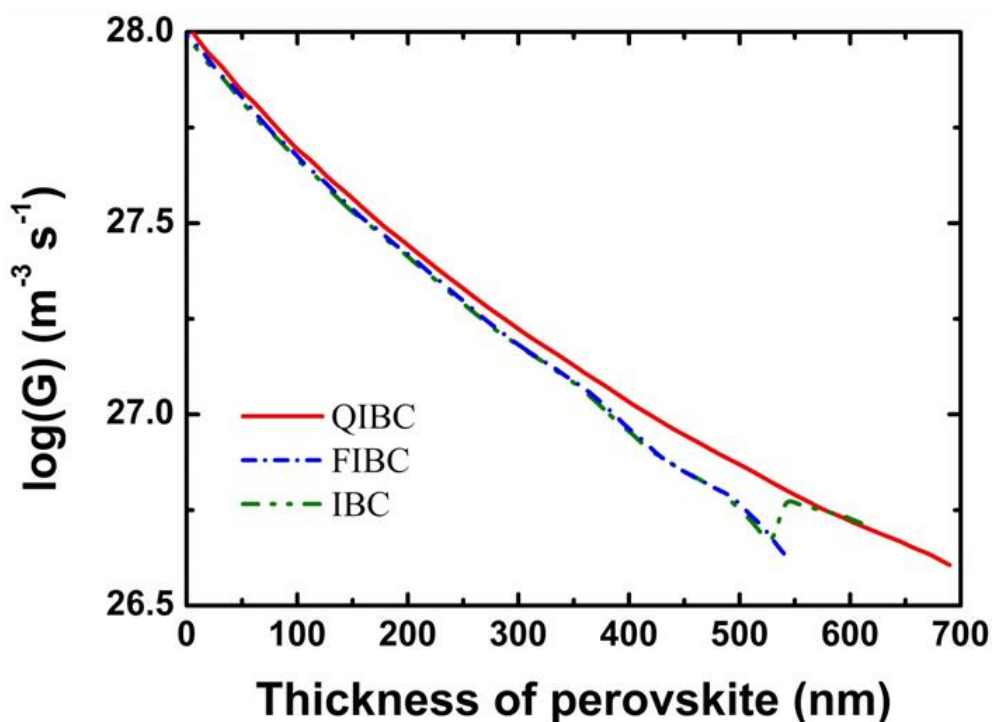
мұндағы $\lambda_1 = 300\text{нм}$, $\lambda_2 = 800\text{нм}$. 2.5 Суретте жоғарыда сипатталған тұжырымдама мен MAPbI_3 сіңіру коэффициентін қолдана отырып, металл оқшаулағыш жартылай өткізгіш құрылымына негізделген икемді перовскит қабаты үшін алынған тасымалдаушылардың генерация жылдамдығының 2D карталарын көрсетілген.

3.2 суретте КБКК, ЖБКК және БКК ПКЭ үшін кеңістіктік екі өлшемді (2D) зарядты генерациялау профиль карталарын көрсетеді. Күткендей, перовскит қабатының жоғарғы бетіне жақын заряд тасымалдаушылардың генерациясы осы аймақтардағы түсетін жарықтың көп бөлігін сіңіруге байланысты ең жоғары болып табылады. Перовскит қабатының төменгі жағына жақын жерде тасымалдаушы ұрпақ фотондар санының біршама экспоненциалды төмендеуіне байланысты шашыраңқы болады, өйткені түскен жарық жұтқыш қабатынан әрі қарай өтеді. Барлық үш схема НТЛ қабаттары бойынша тасымалдаушы генерациясының таралуының өзіндік, толқын тәрізді сипатын көрсетеді. Бұл НТЛ қабатының астындағы мыс металл электродтарынан шағылысатын жарықпен түсетін жарықтың конструктивті және деструктивті кедергісіне байланысты. Барлық үш КБ-ПКЭ конструкциялары үшін зарядты генерациялау профильдерінің карталарындағы жалпы тенденциялар ұқсас болып көрінгенімен, олардың арасында келесі себептерге байланысты шамалы айырмашылықтар бар: 1) ЭТТ арнайы формалары, 2) ЕТЛ және НТЛ қабаттарының ені және 3) аудан бірлігіне перовскит қабатының көлемінен бірдей мәндер. КБКК, ЖБКК және БКК конструкциялары бар КБ ПКЭ НТЛ қабаттарының үстіндегі перовскит қабаттарының қалыңдығы бір-біріне жақын (сәйкесінше 510 нм, 600 нм және 592,73 нм). Демек, барлық үш құрылғы дизайнындағы НТЛ қабаттарының үстіндегі аймақтардағы заряд тасымалдаушы жылдамдығының профильдік карталары салыстырмалы. ЕТЛ қабаттарының үстінде орналасқан аймақтар үшін зарядтау профильдерінің карталары салыстырылған кезде жағдай басқаша болады. ПКЭ ЖБКК және БКК үшін ЕТЛ қабаттарындағы зарядты генерациялау профильдерінің карталары перовскит қабаттарының салыстырмалы қалыңдығына байланысты ұқсас (сәйкесінше 600 және 592,73 нм). Дегенмен, ЕТЛ бөлігінің үстіндегі перовскиттің қалың қабатына байланысты КБКК ПКЭ-те ЕТЛ қабатының үстіндегі зарядты генерациялау профилінің картасы ЖБКК және БКК конструкциялары бар ВС-ПКЭ-ке қарағанда жоғары (z бағытында). Бұл КБКК-ПКЭ-ке ЖБКК және БКК конструкциялары бар КБ-ПКЭ-ке қарағанда тік бағытта көбірек фотондарды сіңіруге мүмкіндік береді. Осылайша, ЖБКК және БКК ПКЭ КБКК ПКЭ - пен салыстырғанда бүйірлік бағытта көбірек фотондарды сіңіреді.



3.2 сурет - КБКК (а), ЖБКК (b) және БКК (с) ПКЭ үшін фотоактивті перовскит қабатындағы тасымалдаушылардың генерация жылдамдығының профильдік карталары хz- жазықтықтыңында көрсетілген

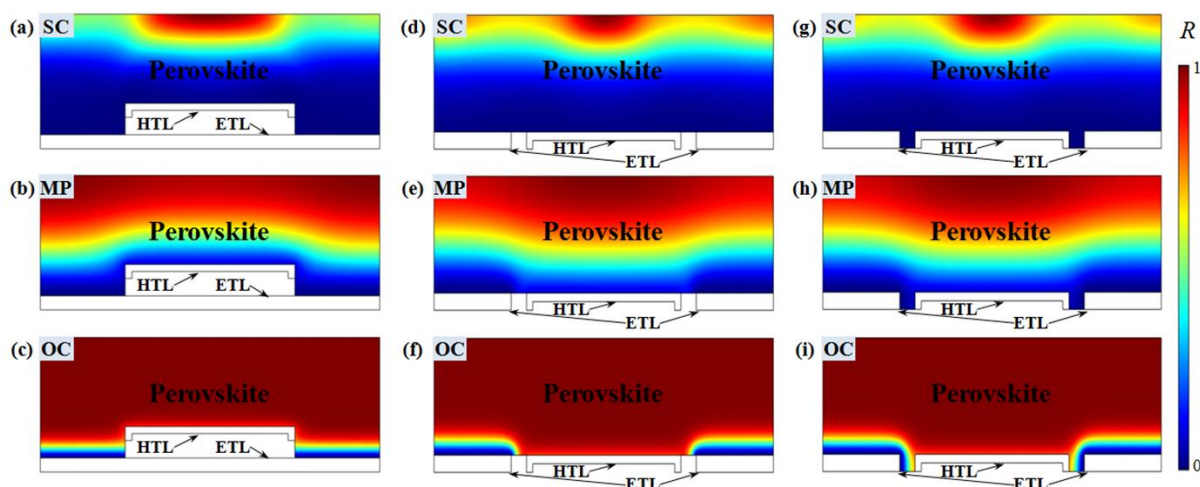
3.3 суретте КБКК, ЖБКК және БКК ПКЭ үшін орташа зарядты генерациялау жылдамдығының профильдері перовскит қабатының жоғарғы және төменгі беттеріне z бағытында көрсетілген (x бағытында зарядты тасымалдаушы жылдамдығының профильдік карталарын орташалау арқылы алынған). КБКК және ЖБКК конструкциялары перовскит қабатының жоғарғы бетінен құрылғылардың анодты және катодты қабаттарының бетіне дейінгі зарядтың пайда болу жылдамдығының профильдерінде бірдей тенденцияларға ие. Дегенмен, КБКК конструкциясы бар құрылғылардың 592,73 нм-ден 672,73 нм-ге дейінгі диапазонда қосымша ерекшелігі бар екенін атап өткен жөн, бұл анод пен катод қабаттары арасында орналасқан перовскит қабатының жарықты сіңіруімен түсіндіріледі (3.3 суретте қараңыз). КБКК ПКЭ-ке келетін болсақ, ~500 нм дейінгі тасымалдаушы жылдамдығының профиль мәндері ЖБКК және БКК ПКЭ мәндеріне ұқсас. Дегенмен, КБКК ПКЭ үшін ~500 нм мен 690 нм арасындағы аймақта тасымалдаушы генерация жылдамдығы профилінің айқын үстемдігі байқалады. Бұл ЖБКК және БКК ПКЭ-ке қарағанда КБКК ПКЭ ETL бөлігінің үстіндегі перовскит қабатының қалыңдығына (фотонды көбірек сіңіру үшін ену тереңдігіне) байланысты. Тасымалдаушының генерация жылдамдығы бойынша көлемдік заряд тығыздығын бағалау сәйкесінше КБКК, ЖБКК және БКК ПКЭ үшін $38,957 \text{ C cm}^{-3}$, $22,823 \text{ C cm}^{-3}$ және $25,278 \text{ C cm}^{-3}$ әкеледі, бұл суретте көрсетілген зарядты генерациялау жылдамдығының профильдеріндегі тенденцияларға сәйкес келеді. Тұтастай алғанда, бұл салыстырмалы талдау осы үш конструкцияның ішінде КБКК ПКЭ ең жоғары, ал ЖБКК ПКЭ ең төменгі жарық жинау қабілетіне ие екенін көрсетеді.



3.3 сурет - КБКК (қызыл), ЖБКК (көк) және БКК (жасыл) архитектураларындағы перовскит қабатындағы генерация жылдамдығының орташаланған профильдері

Құрылғылардың белсенді қабатындағы фотогенерацияланған заряд тасымалдаушылардың рекомбинациясы КБ-ПКЭ электродтарының дизайны әсер етуі мүмкін тағы бір маңызды параметр болып табылады. 3.4 суретте қысқа тұйықталу (ҚТ), максималды қуат (МҚ) және ашық тізбек (АТ) жағдайында ККББ, ЖБКК және КББ ПКЭ перовскит қабатындағы заряд тасымалдаушы рекомбинациясының кеңістіктік таралуы көрсетілген. ҚТ күйінде (3.4 суретте. 3 а, d және g) рекомбинация шығындары перовскит қабатының жоғарғы бетіне жақын жерде және негізінен КБ-ПКЭ барлық үш конструкциясында НТЛ аймақтарында ең күшті болып табылады. Сондай-ақ, барлық үш КБ-ПКЭ конструкцияларында ҚТ күйіндегі ЕТЛ аймақтарында рекомбинация кезінде кейбір елеулі шығындар бар. МҚ режимінде (суретті қараңыз. 3 в, е және h) рекомбинация шығындары барлық үш құрылғыда аса ауыр болады. Рекомбинациялық шығындар НТЛ және ЕТЛ аймақтарында құрылғылардың төменгі жағына қарай біртіндеп төмендеуімен перовскит қабатының жоғарғы бетіне жақын жерде ең үлкен болады. АТ шартымен (3.4 суретте. 3 с, f және i) фотогенерацияланған заряд тасымалдаушылар құрылғылардан алынбайды және рекомбинацияға байланысты толығымен жоғалады. Заряд тасымалдаушылардың рекомбинация жылдамдығын сандық бағалау фотогенерацияланған заряд тасымалдаушылардың қанша бөлігі ПКЭ құрылғыларындағы фототокқа үлес қосатыны туралы ақпарат бере алады. Осы себепті, перовскит қабатының тереңдігі бойынша заряд тасымалдаушылардың орташа рекомбинация

жылдамдығының профильдері суретте көрсетілген рекомбинация кезінде екі өлшемді жоғалту үлестірімдері арқылы бағаланады.



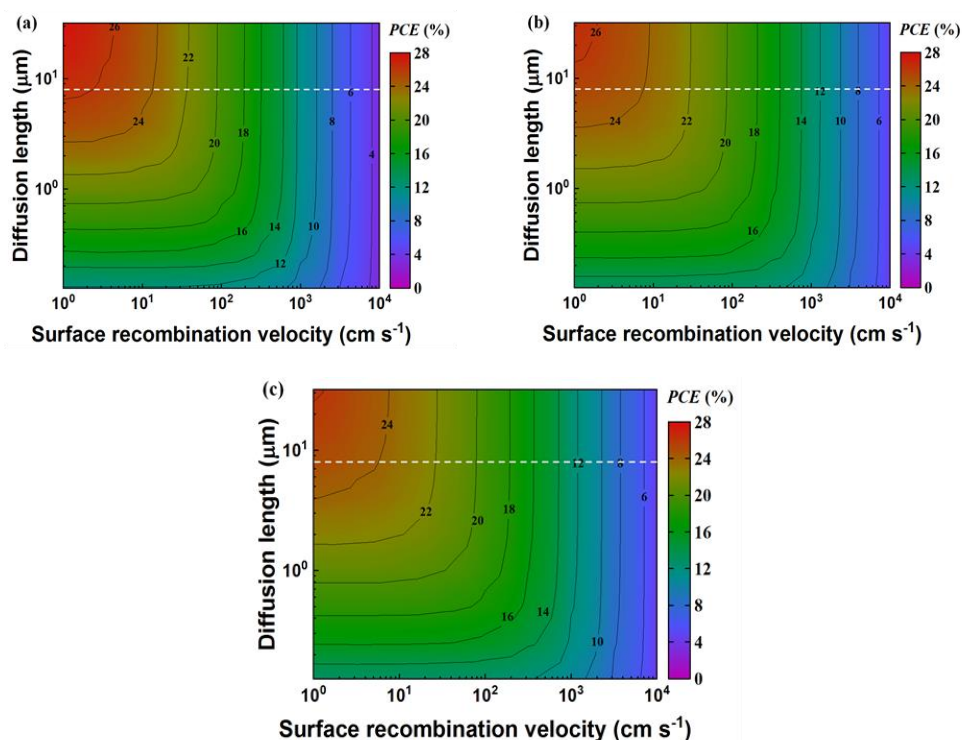
3.4 сурет - (a, d, g) ҚТ, (b, e, h) МҚ және (c, f, i) АТ жағдайларында КББК (a-c), ЖББК (d-f) және ББК (g-i) ПКЭ үшін перовскит аймақтарындағы рекомбинация жылдамдығының нормаланған таралуы xz жазықтығында көрсетілген

Үш түрлі құрылғы архитектурасының фотоэлектрлік параметрлері 1-кестеде жинақталған. Нәтижелер кері байланыс құрылғыларының әртүрлі конструкцияларына байланысты әртүрлі зарядты генерациялау және рекомбинация жылдамдықтарының J-V сипаттамаларына әсерін көрсетеді. ПКЭ КББК ЭТТ-ді 25,98% деңгейінде көрсетеді, бұл осы үш дизайн түрінің ішіндегі ең жоғары көрсеткіш. КББК ПКЭ тиімділігі 25,72 % құрайды, бұл ББК ПКЭ құрылғылары үшін 25,42% тиімділіктен сәл ғана жоғары. КББК ПКЭ үшін жоғары ЭТТ мәніне ықпал ететін негізгі фактор J_{SC} мәні болып табылады. КББК ПКЭ-ларында. Айта кету керек, V_{OC} мәні $\sim 1,25$ В және FF мәні $\sim 0,84$ ВС-ПЭК барлық үш түрі үшін қол жеткізіледі. Бұл зарядтау мен рекомбинация жылдамдығының айырмашылығы ББК ПКЭ дизайнына қарамастан, осы фотоэлектрлік параметрлерде айтарлықтай өзгерістер тудырмайтынын көрсетеді. Нәтижелер КББК, ЖББК және ББК ПКЭ үшін әр түрлі толқын ұзындығында жиналған заряд тасымалдаушылардың құрылғылардан құлаған фотондарға қатынасын көрсетеді. ПКЭ сіңіру шекарасы 800 нм құрайды, өйткені бұл жұмыста қолданылатын перовскит жолағының ені 1,55 эВ құрайды. Қарастырылып отырған спектрлік диапазонда (300 нм - ден 800 нм-ге дейін) КББК ПКЭ үшін EQE мәндері ең жоғары, ал КББК ПКЭ үшін ең төмен. ЖББК ПКЭ үшін EQE мәндері ББК ПКЭ-тен сәл жоғары.

1 кесте - КБКК, ЖБКК және ББКК ПКЭ күн батареясының параметрлері

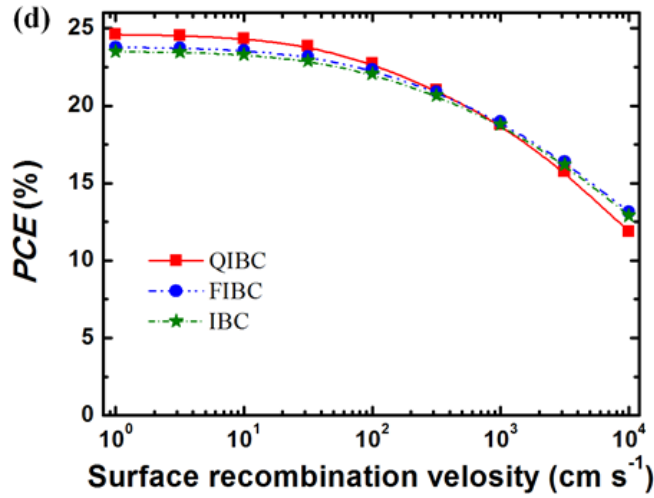
Type	$J_{sc}(mAcm^{-2})$	$V_{oc}(V)$	FF (%)	PCE (%)
КБКК	24.502	1.250	0.840	25.72
ЖБКК	23.420	1.253	0.844	24.75
ББКК	23.062	1.253	0.846	24.44

3.9 суретте ЭТТ КБКК, ЖБКК және ББКК ПКЭ өзгерісін перовскит қабатында заряд тасымалдаушының диффузиялық ұзындығының (L_D) және $S_{N,P}$ әр түрлі комбинацияларымен көрсетеді. L_D , $\mu_{n,p}$ және $\tau_{n,p}$ - ны келесі $L_D = ((\mu_{n,p}\tau_{n,p}k_B T)/q)^{1/2}$ қатынасы арқылы біртұтас параметрге біріктіреді, онда k_B Больцман константасы, T абсолютті температура, ал q элементар заряд болып табылады. Ішкі конфигурациялар 3.9 суретте көрсетілген. 7 беттік рекомбинация аз және заряд тасымалдаушылардың диффузия ұзындығы үлкен болатын жағдайлар жоғары өнімділікпен КБ-ПКЭ алу үшін қолайлы екенін көрсетеді. Шамамен 20% ЭТТ мәндерін КБ-ПКЭ барлық үш түрімен алуға болады, L_D мәндері ~ 3 мкм және $S_{N,P}$ мәндері $\sim 10 \text{ cm}^{-1}$ үлкен. Алайда, ЭТТ мәндері L_D және S_N мәндерінің 25% - дан жоғары болса, р сәйкесінше жоғары және төмен болуы керек. 7d S_N -ге байланысты ЭТТ өзгеру профилін көрсетеді, $L_D = 8$ мкм (3.9 а-с суреттегі ақ нүктелі сызықты қараңыз).



3.9 сурет - КБКК (a), ЖБКК (b) және ББКК (c) заряд тасымалдаушылардың диффузия ұзындығының және перовскит қабатындағы

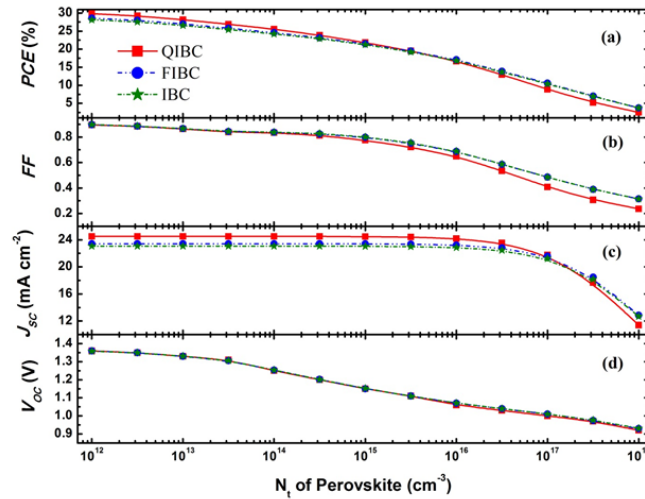
электрондардың/кемтіктердің ($s_{n,p}$) беттік рекомбинация жылдамдығының әртүрлі комбинацияларының ЭТТ өзгеруі



3.10 сурет - КБКК (қызыл), ЖБКК (көк) және БКК (жасыл) ($L_d = 8\mu m$) үшін ЭТТ (d) электрондардың/кемтіктердің ($S_{n,p}$) беттік рекомбинация жылдамдығының тәуелділігі

3.11 суретте КБКК, ЖБКК және БКК ПКЭ фотоэлектрлік параметрлерінің перовскит фото жұтқыш қабатындағы ақаулардың көлемдік тығыздығына (N_t) тәуелділігі көрсетілген. N_t мәндері 10^{14} -тен 10^{16} cm^{-3} -ке дейін екі ретке өссе де, құрылғылардың J_{SC} мәндері айтарлықтай тұрақты болып қалатынын көрсетеді. Осыдан кейін барлық үш құрылғының J_{SC} мәндері күрт төмендейді, олардың бастапқы мәндерінің шамамен 50% төмендейді. КБКК ПКЭ ішіндегі J_{SC} мәндері $10^{14} \text{ cm}^{-3} \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ диапазонындағы N_t мәндері үшін ЖБКК және БКК ПКЭ мәндерінен сәл жоғары болып қалады. $N_t = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ кезінде барлық үш типтегі құрылғылардың J_{SC} мәндері бір-біріне сәйкес келеді. 10^{17} cm^{-3} -тен асатын N_t мәндерінде КБКК ПКЭ-тегі мазмұны ЖБКК және БКК ПКЭ-тен сәл аз болады. Құрылғыдағы мәндері $N_t = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ жеткенде $\sim 30\%$ төмендейді. Барлық үш құрылғыдағы FF мәндері N_t мәндері $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ -тен $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ -ке дейін өскен кезде өте баяу төмендейді (3.11 суретті қараңыз 5с). Содан кейін FF мәндері N_t мәндері одан әрі жоғарылаған сайын біршама жылдам қарқынмен азаяды. $N_t = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ шамасынан бастап КБКК, ЖБКК және БКК ПКЭ-тен кішірейіп бара жатқан сияқты, және бұл сәйкессіздік N_t мәндері одан әрі жоғарылаған сайын айқынырақ болады. N_t , ПКЭ мәндерінің жоғарылауымен FF деңгейінің төмендеуінің үздіксіз тенденцияларына байланысты құрылғылар перовскит қабатындағы ақаулардың тығыздығы жоғарылаған сайын нашарлайды (3.11 суретті қараңыз. 5d). Осы жұмыста қарастырылған ең жоғары N_t мәні (10^{18} cm^{-3}) кезінде барлық үш типтегі құрылғылардағы ЭТТ мәндері $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ бастапқы мәндерімен салыстырғанда шамамен 90% немесе одан жоғары төмендейді. 10^{14} және 10^{16} cm^{-3} арасындағы N_t мәндері үшін барлық

құрылғылардың ЭТТ бір-біріне сәйкес келетінін атап өтеміз. Осы диапазоннан төмен ($<10^{16} \text{ см}^{-3}$) КБКК ПКЭ, ЖБКК және БКК ПКЭ қарағанда сәл жақсы жұмыс істейді, ал осы диапазоннан жоғары ($>10^{16} \text{ см}^{-3}$) ЖБКК және БКК ПКЭ КБКК ПКЭ қарағанда сәл жақсы жұмыс істейді. ЭТТ қиылысы және КБКК ПКЭ үшін қисықтарды ЖБКК және БКК ПКЭ үшін қисықтармен салыстыру КБКК ПКЭ сипаттамалары ЖБКК және БКК ПКЭ-ке қарағанда ақаулардың тығыздығының өзгеруіне біршама жоғары сезімталдыққа ие екенін көрсетеді.



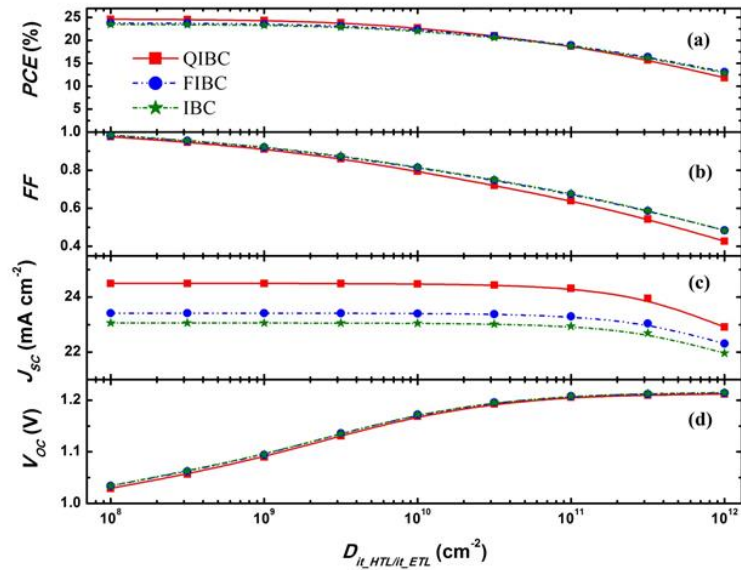
3.11 сурет - КБКК(қызыл), ЖБКК (көк) және БКК (жасыл) үшін ПКЭ (a), FF (b), J_{sc} (c) және V_{oc} (d) көлемдік ақаудың тығыздығына тәуелділік графигі

3.12 суретте КБКК, ЖБКК және БКК ПКЭ фотоэлектрлік параметрлерінің ETL/перовскит шекарасында, сондай-ақ HTL/перовскит шекарасында фазааралық тұзақтардың тығыздығына тәуелділігін көрсетеді. Фазалық интерфейстегі электрондар мен тесіктердің тығыздығы $D_{it_HTL}/D_{it_ETL} = S_{n,p}\sigma_{n,p}v_{n,p}$ қатынасымен өрнектеледі, мұндағы $S_{n,p}$ - электрондар мен тесіктердің беттік рекомбинациясының жылдамдығы, $\sigma_{n,p}$ - электрондар мен тесіктердің көлденең қимасы, ал v_{th} - электрондар мен тесіктердің жылу жылдамдығы. заряд тасымалдаушылар. 3.12 суретте 6А $D_{it_HTL}/D_{it_ETL} =$ мәндерінің ауқымы үшін V_{oc} (10^8 -ден 10^{12} см^{-3} -ке дейін) құрылғылардың барлық үш түріндегі J_{sc} мәндері өзгеріссіз қалатынын көрсетеді

$D_{it_HTL}/D_{it_ETL} =$ мәні $\sim 3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ болатындай дәрежеде өзгермейді. $D_{it_HTL}/D_{it_ETL} =$ мәндерін одан әрі арттыру барлық үш құрылғыда J_{sc} мәндерінің шамалы төмендеуіне әкеледі. 3.12 суретте 6В фазааралық тұзақтың тығыздық мәндерінің жоғарылауымен құрылғылардағы да артады және $D_{it_HTL}/D_{it_ETL} =$ мәндері $3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ немесе одан жоғары болған кезде қанықтыра бастайды. Қарастырылып отырған $D_{it_HTL}/D_{it_ETL} =$ диапазоны үшін (10^8 - ден 10^{12} см^{-3} дейін) барлық үш құрылғының V_{oc} мәндері 1×10^8 -ден $3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ дейінгі диапазонды қоспағанда, бір-біріне азды-көпті сәйкес келеді.

Интерфейстегі ұстау тығыздығының өзгеруі әсер ететін сияқты құрылғылардың саны айтарлықтай азайды (3.12 суретте бс). $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} = -$ ді 108-ден 1012 cm^{-3} -ке дейін арттыру барлық үш құрылғыдағы FF-ті бастапқы мәндерімен салыстырғанда шамамен 50% - ға төмендетеді. Төменгі мәндерде $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} = \text{FFs}$ барлық үш құрылғы шамамен бірдей. Алайда, үлкен мәндерде $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} = \text{FF}$ КБКК ПКЭ ЖБКК және БКК ПКЭ-тен кішірейеді. Осы тәуелділікпен V_{oc} , J_{sc} және FF $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} = \text{ЭТТ}$ барлық үш құрылғыда $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} =$ мәндерінің жоғарылауымен азаяды. 3.12 суретте бD $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} = 108$ -ден 1012 cm^{-3} ге дейін өзгерген кезде көрсетілген-3 ЭТТ КБКК, ЖБКК, БКК ПКЭ олардың бастапқы мәндерінің шамамен 50 % төмендейді. $D_{it_HTL} / D_{it_ETL} = (<109 \text{ cm}^{-3})$ төмен мәндерінде КБКК ПКЭ ЖБКК және БКК ПКЭ-тен сәл жоғары ЭТТ көрсетеді.

КБКК ПКЭ-ке қарағанда ЭТТ мәндері сәл жоғары. КБ-ПКЭ-тің ақаулардың көлемдік тығыздығына реакциясы, ЭТТ қиылысы және КБКК ПКЭ үшін HTL/ETL қисықтарын ЖБКК және БКК ПКЭ үшін қисықтармен салыстыру КБКК ПКЭ сипаттамаларының ЖБКК және БКК ПКЭ-пен салыстырғанда фазааралық тұзақ тығыздығының өзгеруіне сезімталдығы біршама жоғары екенін көрсетеді.



3.12 сурет - КБКК (қызыл), ЖБКК (көк) және БКК (жасыл) үшін ЭТТ (a), FF (b), J_{sc} (c) және V_{oc} (d) интерфейс тұзағының тығыздығына тәуелділік графигі

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, сандық модельдеу әдістері БКК-ПКЭ оптикалық және электрлік қасиеттерін (КККБ), ЖБКК және БКК конструкцияларымен зерттеу және салыстыру үшін қолданылады. КБКК конструкциясы бар ККБ-ПКЭ -дің жарық түсіру қабілеті жоғары екендігі анықталды, ал ЖБКК және БКК конструкциялары салыстырмалы нәтижелер көрсетті. Зарядтардың рекомбинация жылдамдығын бағалау рекомбинацияның ең аз шығыны ЖБКК ПКЭ - де, ал ең жоғарғысы КБКК-ПКЭ -де табылғанын көрсетеді. Перовскит қабатының материал параметрлерінің құрылғылардың жұмысына әсері КАКБ дизайны бар БКК-ПКЭ оңтайлы жағдайларда ең жақсы фотоэлектрлік өнімділікті көрсететінін көрсетті. Алайда, ЖБКК және БКК конструкциялары бар БКК-ПКЭ перовскит қабатындағы белгілі бір электронды ақауларға төзімді және мұндай жағдайларда КБКК-ПКЭ -ге қарағанда жоғары ЭТТ мәндерін шығара алады. КБКК дизайны үнемді, масштабталатын және қарапайым өндіріс мүмкіндіктерінің арқасында жоғары өнімді КБКК-ПКЭ әзірлеу кезінде ЖБКК және БКК конструкцияларымен салыстырғанда жақсырақ қолдану әлеуетіне ие сияқты. Тұтастай алғанда, осы жұмыста ұсынылған Біздің нәтижелеріміз КБКК, ЖБКК және БКК конструкциялары бар БКК-ПКЭ оптикалық және электрлік қасиеттері туралы түсінік береді, олар әдебиетте жоғары өнімді ПКЭ әзірлеу үшін ұсынылған КБКК конструкциялары болып табылады. Бұл жұмыстың нәтижелері КБКК-ПКЭ эксперименттік зерттеулерінің болашақ дамуы үшін белгілі бір перспектива мен бағытты қамтамасыз етеді.

Қысқартылған сөздер

- ЭТТ** - Энергияны түрлендіру тиімділігі
ПКЭ - Перовскитті күн элементтері
КЭ - Күн элементтері
ФК - Фотонды кристалдардың
СЭӘ - Соңғы элементтер әдісін
НФК - ФК технологиясымен
ЖЖ1.5 - «Жаһандық жылыну 1,5°C» туралы арнайы есеп
КӨЖҮК - Климаттың өзгеруі жөніндегі үкіметаралық комиссия
ПГ - Парниктік газдардың
КӨ5 - Климаттың өзгеруін бағалау туралы 5-ші есебі
ҚОЖӨПНКГШ - Қазба отындарын жағу және өндірістік процестер нәтижесінде көмірқышқыл газының шығарындылары
ОШПНКГШ - Орман шаруашылығы және басқа да жер пайдалану нәтижесінде көмірқышқыл газының шығарындылары
ЖЭК - Жаңартылатын энергия көздерінің
ФМ - Фотоэлектрлік модульдерді
БҰҰКӨНК - Біріккен Ұлттар Ұйымының Климаттың өзгеруі туралы негіздемелік конвенциясы
ПК - Париж келісімі
ТК - Тараптардың үшінші конференциясы
ҰДАЖ - Ұлттық деңгейде айқындалатын жарналарын
ККБ - Кремний күн батареяларының
МУГС - Мыс, Үндістан және галлий селенидінің
СКЖ - Сенсбилизацияланған күн жасушалары
КБ - Кері байланыс
ЭТҚ - Электрон-тандау қабат
ССҚЖ - Саңылауларға арналған селективті қабат жүйесі
АҚҚ - Атомдық қабатын қолдану
ЛБТИ - Литий-бис (трифторметансульфонил)имидид
ПЭЕС - Поли (3,4 этилендиокситиофен) (3,4-ethylenedioxythiophene) - поли(стиролсульфонат) (styrenesulfonate)
ПМ - Перовскит материалының
ИҚО - Индий-қалайы оксиді
ФҚО - Фтормен легирленген қалайы оксиді
МӨО - Мөлдір өткізгіш оксидтер
АКБ - Ауыстырылатын кері байланыс
КАКБ - Квази-ауыстырылатын кері байланыс

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Allen M. R., Dube O. P., Solecki W. Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response T // InPress. – 2019. – с. 49–91.
2. C. P. Morice, J. J. Kennedy, N. A. Rayner, and P. D. Jones Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set // J. Geophys. Res. Atmos. InPress. – 2012. - vol. 117, no. 8. - с. 1–22.
3. IPCC, AR5 - Working Group 3, Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III // Cambridge, United Kingdom and New York. – 2014.
4. J. G. J. Olivier, K. M. Schure, and J. A. H. W. Peters, “Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions,” PBL Netherlands Environ. Assess. Agency, no. 2017
5. R. A. Houghton and A. A. Nassikas, “Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015,” Global Biogeochem. Cycles, // InPress. – 2017. - vol. 31, no. 3. - с. 456–472.
6. R. Etkins and E. S. Epstein, “Rise of Global Mean Sea Level As an Indication of Climate Change.,” Am. Assoc. Adv. Sci., // InPress. – 1982. - vol. 215, no. 4530. - с. 343–359.
7. K. K. Rigaud et al., “Groundswell - Preparing for internal climate migration,” Washington, DC World Bank, // InPress. – 2018. - с. 256.
8. C. Parmesan, “Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change,” Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst., // InPress. – Dec. 2006. - vol. 37, no. 1. - с. 637–669.
9. I. C. Chen, J. K. Hill, R. Ohlemüller, D. B. Roy, and C. D. Thomas, “Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming,” Science (80-.), // InPress. – Aug. 2011. - vol. 333, no. 6045. - с. 1024–1026.
10. K. D. Tape, D. D. Gustine, R. W. Ruess, L. G. Adams, and J. A. Clark, “Correction: Range expansion of moose in Arctic Alaska linked to warming and increased shrub habitat,” PLoS One, InPress. – Apr. 2016. - vol. 11, no. 7. - с. 1–12.
11. N. Tokarevich, A. Tronin, B. Gnativ, B. Revich, O. Blinova, and B. Evengard, “Impact of air temperature variation on the ixodid ticks habitat and tick-borne encephalitis incidence in the Russian Arctic: The case of the Komi Republic,” Int. J. Circumpolar Health, // InPress. – Jan. 2017. - vol. 76, no. 1. - с. 1–13.
12. P. Forman, “The primacy of science in modernity, of technology in postmodernity, and of ideology in the history of technology,” Hist. Technol., // InPress. – 2007. - vol. 23, no. 1–2. - с. 1–152.
13. Energy Information Administration, “International Energy Statistics: Imports,” 2013. [Online]. Available: // Nat.Comm.- Feb. 2019.- 11. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=5&pid=57&aid=3&cid=r6,&syid=2009&eyid=2013&unit=TBPD>.

14. K. P. Bhandari, J. M. Collier, R. J. Ellingson, and D. S. Apul, "Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, // InPress. – Jul. 2015. - vol. 47. - c. 133–141.
15. M. Raugei, S. Bargigli, and S. Ulgiati, "Life cycle assessment and energy payback time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to polySi," *Energy*, // In.Press. – Aug. 2007. - vol. 32, no. 8. - c. 1310–1318.
16. N. Stylos and C. Koroneos, "Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems," *J. Clean. Prod.*, // InPress. Feb. 2014. - vol. 64. - c. 639–645.
17. P. Viebahn et al., "Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany," *Int. J. Greenh. Gas Control*, // InPress. – Apr. 2007. - vol. 1, no. 1. - c. 121–133.
18. R. Dones, T. Heck, M. F. Emmenegger, and N. Jungbluth, "Life cycle inventories for the nuclear and natural gas energy systems, and examples of uncertainty analysis," *Int. J. Life Cycle Assess.*, // InPress. – Jan. 2005. - vol. 10, no. 1. - c. 10–23.
19. J. G. Canadell and M. R. Raupach, "Managing forests for climate change mitigation," *Science (80-.)*, // In.Press. – 2008. - vol. 320, no. 5882. - c. 1456–1457.
20. H. A. Aulich and F. W. Schulze, "Crystalline silicon feedstock for solar cells," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, // InPress. – Mar. 2002. - vol. 10, no. 2. - c. 141–147.
21. R. Webster, "Will the Paris climate deal be legally binding? ," *Road to Paris*, 2015.
22. A. Slade and V. Garboushian, "27.6% efficient silicon concentrator cell for mass production," *Tech. Dig. 15th Int. Photovolt. Sci. Eng. Conf. Shanghai*, // InPress. – 2005. - vol. 701.
23. F. Dimroth et al., "Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells," *IEEE J. Photovoltaics*, // InPress. – Jan. 2016. - vol. 6, no. 1. - c. 343–349.
24. I. Repins, S. Glynn, J. Duenow, T. J. Coutts, W. K. Metzger, and M. A. Contreras, "Required material properties for high-efficiency CIGS modules," *Soc. Photogr. Instrum. Eng. 2009 Sol. Energy + Technol. Conf.*, // InPress. – Aug. 2009. - vol. 7409, no. July, c. 74090M.
25. T. Sherahilo, "Oxford PV perovskite solar cell achieves 28% efficiency," *Oxford PV*, 2018. [Online]. Available: <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pvperovskite-solar-cell-achieves-28-efficiency>. [Accessed: 19-Feb-2019].
26. J. C. Slater, "Atomic radii in crystals," *J. Chem. Phys.*, // InPress. – 1964. - vol. 41, no. 10, c. 3199–3204.
27. G. E. Eperon et al., "Perovskite-perovskite tandem photovoltaics with optimized band gaps," *Science (80-.)* // InPress. – 2016. - vol. 354, no. 6314. - c. 861–865.

28. A. Miyata et al., “Direct measurement of the exciton binding energy and effective masses for charge carriers in organic-inorganic tri-halide perovskites,” *Nat. Phys.*, // InPress. – Jul. 2015. - vol. 11, no. 7. - c. 582–587.
29. G. Yang, H. Tao, P. Qin, W. Ke, and G. Fang, “Recent progress in electron transport layers for efficient perovskite solar cells,” *J. Mater. Chem. A*, // InPress. – 2016. – 11. - c. 3970–3990.
30. P. Docampo, J. M. Ball, M. Darwich, G. E. Eperon, and H. J. Snaith, “Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates,” // InPress. – Dec. 2013. – 4. - c. 2761.
31. Y. Song, W. Bi, A. Wang, X. Liu, Y. Kang, Q. Dong Efficient lateral-structure perovskite single crystal solar cells with high operational stability // *Nat. Commun.* – 2020. – 11. – c. 274-277, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13998-2>.
32. T. Ma, Q. Song, D. Tadaki, M. Niwano, A. Hirano-Iwata, Unveil the full potential of integrated-back-contact perovskite solar cells using numerical simulation, *ACS Appl. Energy Mater* // *Nat. Commun.*- 2018.- 1. – c. 970–975, <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b00044>
33. L.M. Pazos-Outon, M. Szumilo, R. Lamboll, J.M. Richter, M. Crespo-Quesada, M. Abdi-Jalebi, H.J. Beeson, M. Vrućinić, M. Alsari, H.J. Snaith, B. Ehrler, R. H. Friend, F. Deschler, Photon recycling in lead iodide perovskite solar cells, *Science* // *Nat. Commun.*- 2016.- 351. – c. 1430–1433, <https://doi.org/10.1126/science.aaf1168>.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ
Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ
ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ

Студент: Құрманбек Еламан

Мамандығы: 6В07109 – «Инженерлік физика және материалтану»

Дипломдық жұмыстың тақырыбы: «Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және оңтайландыру»

ПІКІР

Құрманбек Еламан дипломдық жұмысты перовскиттік материал негізіндегі кері контактты күн элементтерінің сандық модельдеу арқылы оптикалық дизайны және оптималды параметрлерін анықтауға арналған.

Дипломдық жұмыс үш тараудан тұрады.

Дипломдық жұмыстың бірінші тарауында мәселенің қазіргі жағдайы, күн элементтері және оның тиімділігі туралы шолу жасалынған.

Дипломдық жұмыстың екінші тарауында перовскиттің қасиеттері, перовскиттік күн элементтерінің энергия түрлендіруінің тиімділігінің эволюциясы, перовскиттің құрылымы, диэлектрлік өтімділігі туралы сипатталған.

Жұмыстың үшінші тарауында COMSOL Multiphysics бағдарламасы негізінде модельдеудің нәтижелері көрсетілген. Оның ішінде, заряд тасымалдаушылар генерациясы, рекомбинация жолдарының күн элементі тиімділігіне әсері және т.б. физикалық қасиеттері зерттелінген.

Дипломдық жұмысты бағалау

Студент Құрманбек Еламан «6В07109 – Инженерлік физика және материалтану» мамандығы бойынша техника және технология бакалаврі дәрежесін алуға лайық, ал жұмысы **95% (А)-«өте жақсы»** деген бағаға бағаланады.

Пікір жазушы:

PhD, ассоц.профессор
Шаленов Е.О.
«30» мамыр 2023 ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Құрманбек Еламан

Тақырыбы: Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және онтайландыру

Жетекшісі: Шаленов Е.О

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 1

Әріптерді ауыстыру: 106

Аралықтар: 0

Шағын кеністіктер: 0

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

- Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.
- Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.
- Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні

29.05.2023

Кафедра меңгерушісі

Қудайбергенов К.К.



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
Қ.И.СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ
СЫН-ПІКІР

Дипломдық жұмыс

(жұмыс түрінің атауы)

Құрманбек Еламан

(білім алушының Т.А.Ә.)

6В07109 – «Инженерлік физика және материалтану»

(мамандық шифрі, атауы)

Тақырыбы: «Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің
оптикалық дизайны және оңтайландыру»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС БОЙЫНША ЕСКЕРТУЛЕР

Дипломдық жұмыс тапсырма бойынша толық орындалған. Дипломдық жұмыста жартылай өткізгіш модельдеу арқылы перовскиттік кері контактты күн элементтерін оңтайландыру және физикасына толық түсінік берілген, COMSOL Multiphysics бағдарламасы негізінде модельдеудің нәтижелері көрсетілген. Оның ішінде, заряд тасымалдаушылар генерациясы, рекомбинация жолдарының күн элементі тиімділігіне әсері және т.б. физикалық қасиеттері зерттелінген.

ЖҰМЫСТЫ БАҒАЛАУ

Дипломдық жұмысты қорғауға ұсынылған Құрманбек Еламанның «Перовскиттік кері контактты күн элементтерінің оптикалық дизайны және оңтайландыру» тақырыбына орындалған дипломдық жұмысын «өте жақсы» 96 % бағалап, «бакалавр» дәрежесін алуға лайық деп есептеймін.

Пікір беруші:

ІІЖК-РМК «Жану Проблемалары Институты»

Көміртекті наноматериалдар зертханасының меңгерушісі м.а. PhD

(ғылым ғыл. дәрежесі, атағы)

Досжанов Ерлан Оспанович

(Т.А.Ә.)

«29» тамыз 2023ж.