# QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA TEXNOLOGIYALARI UCHUN YANGI AVLOD FUNKSIONAL MATERIALLARNING KONDENSIRLANGAN HOLAT FIZIKASI

**Xudayberdiyeva O'g'iloy Hasan qizi**
E-mail: xudayberdiyevaogiloy49@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.22767993

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalarida qo'llanilayotgan yangi avlod funksional materiallarning kondensirlangan holat fizikasi nuqtayi nazaridan asosiy xususiyatlari tahlil qilinadi. Quyosh fotoelektrik qurilmalari, termoelektrik generatorlar, energiya saqlash tizimlari va elektrokimyoviy qurilmalarda foydalaniladigan perovskitlar, ikki o'lchamli materiallar, nanostrukturali yarimo'tkazgichlar, yuqori entropiyali materiallar hamda funksional oksidlarning kristall tuzilishi, elektron energetik holatlari, fononlar dinamikasi, zaryad tashuvchilar transporti va issiqlik o'tkazuvchanligi o'rganiladi. Kondensirlangan holat fizikasida materialning makroskopik funksional xususiyatlari uning kristall panjarasi, elektron zonalari, nuqsonlari, interfeyslari va fonon spektri bilan bevosita bog'liqligi ko'rsatiladi. Ayniqsa, perovskitlarning sozlanadigan elektron tuzilishi, past issiqlik o'tkazuvchanligi va kuchli optoelektron xususiyatlari ularni quyosh elementlari va termoelektrik qurilmalar uchun istiqbolli materialga aylantirishi tahlil qilinadi. Shuningdek, materiallarning tarkibi va nanostrukturasini boshqarish orqali energiya konversiyasi va saqlash samaradorligini oshirish imkoniyatlari asoslanadi.

**Kalit so'zlar:** kondensirlangan holat fizikasi, funksional materiallar, qayta tiklanuvchi energiya, perovskit, yarimo'tkazgich, termoelektrik material, fonon, elektron transport, nanostruktura, energiya saqlash.

**Аннотация.** В данной статье анализируются основные свойства функциональных материалов нового поколения, используемых в технологиях возобновляемой энергии, с точки зрения физики конденсированного состояния. Изучаются кристаллическая структура, электронные энергетические состояния, динамика фононов, перенос носителей заряда и теплопроводность перовскитов, двумерных материалов, наноструктурированных полупроводников, высокоэнтропийных материалов и функциональных оксидов, используемых в солнечных фотоэлектрических устройствах, термоэлектрических генераторах, системах хранения энергии и электрохимических устройствах. В физике конденсированного состояния показано, что макроскопические функциональные свойства материала напрямую связаны с его кристаллической решеткой, электронными полосами, дефектами, границами раздела и фононным спектром. В частности, анализируется, как регулируемая электронная структура, низкая теплопроводность и сильные оптоэлектронные свойства перовскитов делают их перспективными материалами для солнечных элементов и термоэлектрических устройств. Также обосновывается возможность повышения эффективности

преобразования и хранения энергии путем контроля состава и наноструктуры материалов.

**Ключевые слова:** физика конденсированных сред, функциональные материалы, возобновляемая энергия, перовскит, полупроводник, термоэлектрический материал, фонон, электронный транспорт, наноструктура, накопление энергии.

**Abstract.** This article analyzes the fundamental properties of next-generation functional materials used in renewable energy technologies from the perspective of condensed matter physics. It examines the crystal structure, electronic energy states, phonon dynamics, charge carrier transport, and thermal conductivity of perovskites, two-dimensional materials, nanostructured semiconductors, high-entropy materials, and functional oxides utilized in solar photovoltaic devices, thermoelectric generators, energy storage systems, and electrochemical devices. The study demonstrates the direct relationship between a material's macroscopic functional properties and its crystal lattice, electronic bands, defects, interfaces, and phonon spectrum within the framework of condensed matter physics. Particular attention is paid to how the tunable electronic structure, low thermal conductivity, and strong optoelectronic properties of perovskites make them promising materials for solar cells and thermoelectric devices. Furthermore, the article discusses the potential to enhance energy conversion and storage efficiency by controlling material composition and nanostructure.

**Key words:** condensed matter physics, functional materials, renewable energy, perovskite, semiconductor, thermoelectric material, phonon, electron transport, nanostructure, energy storage.

**Kirish.** Global energetika tizimida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi ortib borishi energiyani ishlab chiqarish, konversiya qilish va saqlash uchun yangi avlod materiallarini yaratishni talab qilmoqda. Quyosh va shamol energetikasining o‘zgaruvchan tabiati yuqori samarali energiya saqlash qurilmalarini, quyosh nurlanishini elektr energiyasiga aylantiruvchi samarali materiallarni hamda chiqindi issiqlikni elektr energiyasiga aylantirish imkonini beruvchi termoelektrik tizimlarni rivojlantirishni taqozo etadi. Zamonaviy tadqiqotlarda perovskitlar, nanostrukturali materiallar va yangi termoelektrik birikmalar ushbu vazifalarni hal qilish uchun muhim yo‘nalish sifatida qaralmoqda. Mazkur jarayonda kondensirlangan holat fizikasi alohida ilmiy ahamiyatga ega. Chunki qattiq jismlarning elektr, optik, magnit, issiqlik va mexanik xususiyatlari atomlarning kristall panjarada joylashuvi, elektronlarning energetik holatlari, fononlar, nuqsonlar va interfeyslar bilan belgilanadi. Materialning tarkibini o‘zgartirish yoki uning o‘lchamini nanometr diapazoniga tushirish orqali ushbu fizik xususiyatlarni maqsadli ravishda boshqarish mumkin. Yangi avlod funksional materiallarning asosiy xususiyati shundan iboratki, ular bitta emas, balki bir nechta fizik funksiyani bajarishi mumkin. Masalan, perovskit materiallar fotoelektrik, termoelektrik, dielektrik va elektrokimyoviy qurilmalarda qo‘llanishi mumkin. Ularning strukturasi va tarkibini boshqarish orqali elektron, optik va issiqlik xususiyatlarini o‘zgartirish imkoniyati mavjud.

**Tadqiqotning maqsadi.** Tadqiqotning asosiy maqsadi qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalarida qo‘llaniladigan yangi avlod funksional materiallarning kondensirlangan

holat fizikasi asoslarini o‘rganish hamda ularning strukturaviy, elektron, optik va issiqlik xususiyatlari bilan energetik samaradorligi o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlashdan iborat.

**Adabiyotlar tahlili.** Qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalarining jadal rivojlanishi yangi avlod funksional materiallarning fizik xususiyatlarini chuqur o‘rganishni talab qilmoqda. Ayniqsa, quyosh fotoelektrik elementlari, termoelektrik generatorlar, energiya saqlash qurilmalari va elektrokimyoviy tizimlarda materiallarning kristall tuzilishi, elektron energetik holatlari, optik xususiyatlari, fonon transporti va zaryad tashuvchilar dinamikasi qurilmalarning yakuniy samaradorligini belgilovchi muhim omillar sifatida qaraladi. Shu nuqtayi nazardan, kondensirlangan holat fizikasi doirasidagi tadqiqotlar energetik materiallarning mikroskopik tuzilishi bilan makroskopik funksional xususiyatlari o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlashga qaratilgan. Qattiq jismlarning elektron tuzilishi va energetik zonalari haqidagi fundamental qarashlar Shockley va Queisser tomonidan ishlab chiqilgan nazariy yondashuvlarda o‘z aksini topgan. Ularning tadqiqotida p-n o‘tishli quyosh elementlarining nazariy samaradorlik chegarasi termodinamik va elektron jarayonlar asosida ko‘rsatib berilgan [1, 510–519]. Mazkur nazariya quyosh elementlarida yarimo‘tkazgichning taqiqlangan zona kengligi, foton energiyasi, rekombinatsiya va issiqlik yo‘qotishlari o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni tushunish uchun fundamental asos bo‘lib xizmat qiladi. Keyingi tadqiqotlarda ushbu yondashuv yangi avlod yarimo‘tkazgich materiallarni tanlash va ularning energetik parametrlarini optimallashtirishda qo‘llanib kelmoqda. Polman va hammualliflar fotovoltaik materiallarning hozirgi holati va kelajakdagi rivojlanish istiqbollarini tahlil qilib, energiya konversiyasining samaradorligi materialning faqatgina optik xususiyatlariga emas, balki zaryad tashuvchilarni hosil qilish, tashish va ajratish jarayonlariga ham bog‘liqligini ta’kidlaganlar [2].

Tadqiqotchilar materiallarning nanostrukturasi, interfeys muhandisligi va ko‘p qatlamli arxitekturalarini boshqarish orqali fotoelektrik yo‘qotishlarni kamaytirish mumkinligini ko‘rsatganlar. Mazkur yondashuv kondensirlangan holat fizikasida “strukturaviy xususiyat – elektron xususiyat – funksional samaradorlik” zanjirini shakllantirishda muhim ahamiyatga ega. Yangi avlod funksional materiallari orasida perovskitlar alohida ilmiy qiziqish uyg‘otmoqda. Green, Ho-Baillie va Snaith perovskit quyosh elementlarining shakllanishi va rivojlanishini tahlil qilib, ushbu materiallarning yuqori optik yutilishi, moslashtiriladigan energetik zona tuzilishi va yupqa qatlamlarda samarali fotoelektrik konversiya qilish imkoniyatlariga e’tibor qaratgan [3, 506–514].

Perovskitlarning kristall strukturasi va kimyoviy tarkibini boshqarish orqali ularning taqiqlangan zona kengligi va optoelektron xususiyatlarini maqsadli ravishda o‘zgartirish mumkinligi ushbu materiallarning asosiy afzalliklaridan biridir. Kojima va hammualliflarning tadqiqotlari metall-galogenid perovskitlarning fotoelektrik material sifatidagi istiqbolini namoyon qilgan dastlabki muhim ishlar qatoriga kiradi [4, 6050–6051].

Ushbu tadqiqotdan keyin perovskitlarning optik yutilishi, zaryad tashuvchilar harakatchanligi va fotolyuminessensiya xususiyatlarini takomillashtirishga qaratilgan ko‘plab izlanishlar amalga oshirildi. Natijada perovskit materiallar nafaqat quyosh elementlarida, balki yorug‘lik chiqaruvchi qurilmalar, fotodetektorlar va boshqa optoelektronik tizimlarda ham istiqbolli material sifatida qarala boshlandi. Correa-Baena va hammualliflar perovskit quyosh elementlarining imkoniyatlari bilan bir qatorda ularning ilmiy va texnologik muammolarini ham keng tahlil qilgan [5, 739–744].

Mualliflar materialning tarkibi, kristallik sifati, interfeyslar, nuqsonlar va ion migratsiyasi kabi omillar qurilmaning barqarorligi va samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatganlar. Ayniqsa, kristall panjaradagi nuqsonlar va donalar chegarasi zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasini kuchaytirishi mumkinligi qayd etiladi. Shu sababli perovskit qatlamlarini sintez qilish va ularning mikrostrukturasi ustidan nazorat o‘rnatish muhim tadqiqot yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Snaith perovskit fotovoltaikasining mavjud holati va istiqbollarini o‘rganib, materialning yuqori fotoelektrik xususiyatlari bilan bir qatorda uning uzoq muddatli barqarorligi va ishlab chiqarish texnologiyasini takomillashtirish zarurligini ko‘rsatgan [6, 372–376]. Ushbu yondashuv yangi avlod funksional materiallarini tadqiq qilishda faqat laboratoriya samaradorligini emas, balki materialning amaliy sharoitda ishlash davomiyligi va degradatsiya mexanizmlarini ham hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi.

Qayta tiklanuvchi energiya tizimlari uchun istiqbolli materiallarning yana bir guruhi termoelektrik materiallardir. Termoelektrik materiallarda issiqlik gradientini elektr energiyasiga aylantirish Seebeck effekti orqali amalga oshiriladi. Termoelektrik samaradorlik odatda quyidagi o‘lchamsiz ko‘rsatkich bilan ifodalanadi:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}$$

bu yerda $S$— Seebeck koeffitsiyenti, $\sigma$— elektr o‘tkazuvchanlik, $T$— mutlaq harorat va $\kappa$— issiqlik o‘tkazuvchanligi.

Mazkur ifoda termoelektrik materiallar fizikasi uchun muhim muammoni ko‘rsatadi: yuqori elektr o‘tkazuvchanlik va katta Seebeck koeffitsiyentini ta’minlash bilan birga issiqlik o‘tkazuvchanligini kamaytirish zarur. Shu sababli zamonaviy tadqiqotlarda elektron va fonon transportini mustaqil ravishda boshqarish imkonini beruvchi nanostrukturalar, qotishmalar va ko‘p komponentli materiallarga katta e’tibor qaratilmoqda. Rogach va hammualliflar metall-galogenid perovskitlarning termoelektrik xususiyatlarini tahlil qilib, ularning past issiqlik o‘tkazuvchanligi va elektron tuzilmasini boshqarish imkoniyati termoelektrik qurilmalar uchun muhim afzallik bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatganlar [7]. Perovskitlarda fononlarning kuchli sochilishi panjaraviy issiqlik o‘tkazuvchanligini kamaytirishi mumkin. Bu esa materialning termoelektrik samaradorligini oshirish uchun qulay sharoit yaratadi.

Biroq perovskitlarning termik va kimyoviy barqarorligi hali ham to‘liq hal qilinmagan muammolardan biri hisoblanadi. Kondensirlangan holat fizikasida fononlarning material xususiyatlariga ta’siri alohida o‘rin tutadi. Kristall panjaradagi atomlarning kollektiv tebranishlari fononlar orqali ifodalanadi va ular issiqlik transportining asosiy tashuvchilari hisoblanadi. Nanostrukturaga o‘tish orqali fononlarning chegaralarda sochilishini kuchaytirish va natijada panjaraviy issiqlik o‘tkazuvchanligini kamaytirish mumkin. Shu jihatdan nanokompozitlar va nanostrukturali termoelektrik materiallar energiya konversiyasi uchun istiqbolli hisoblanadi. Yuqori entropiyali materiallar ham so‘nggi yillarda yangi avlod funksional materiallari sifatida faol tadqiq qilinmoqda. Bir nechta elementlarni bitta kristall strukturaga kiritish materialning konfiguratsion entropiyasini oshiradi va uning fizik xususiyatlarini boshqarish uchun keng imkoniyat yaratadi. Yuqori entropiyali perovskitlarda turli elementlarning kombinatsiyasi kristall panjarada lokal buzilishlarni yuzaga keltirishi, elektron energetik holatlar va fonon transportini o‘zgartirishi mumkin. Bunday

materiallarning muhim jihati shundaki, ularning tarkibini o‘zgartirish orqali elektr, optik, magnit va termik xususiyatlarni bir vaqtning o‘zida optimallashtirish imkoniyati mavjud.

Energiya saqlash va konversiya qurilmalarida yuqori entropiyali materiallardan foydalanish bo‘yicha tadqiqotlar ularning elektrokimyoviy barqarorligi va funksional xususiyatlarini yaxshilash imkoniyatlarini ko‘rsatmoqda. Ikki o‘lchamli (2D) materiallar ham kondensirlangan holat fizikasining muhim yo‘nalishlaridan biridir. Grafen, $MoS_2$, $WS_2$ va boshqa qatlamli materiallarda elektronlarning ikki o‘lchamli muhitda harakatlanishi ularning o‘ziga xos optik va elektr xususiyatlarini shakllantiradi. Ushbu materiallarning katta sirt-hajm nisbati, yuqori sirt sezgirligi va ayrim hollarda sozlanadigan bandgap xususiyatlari ularni fotovoltaika, fotokataliz va energiya saqlash tizimlari uchun qiziqarli qiladi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, zamonaviy funksional materiallarni tadqiq qilishda eksperimental usullar bilan bir qatorda hisoblash materialshunosligi ham muhim ahamiyat kasb etmoqda. Zichlik funksionali nazariyasi (DFT) materiallarning elektron tuzilishi, bandgap qiymati, elektron zichligi va boshqa kvant-mehanik parametrlarini oldindan baholash imkonini beradi. Fonon hisoblari esa kristall panjaraning dinamik barqarorligi va issiqlik transportining asosiy mexanizmlarini aniqlashga yordam beradi. Shuningdek, rentgen difraksiyasi (XRD), skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), transmissiya elektron mikroskopiyasi (TEM), atom-kuch mikroskopiyasi (AFM), Raman spektroskopiyasi va fotolyuminessensiya (PL) kabi usullar materiallarning strukturaviy va optik xususiyatlarini eksperimental o‘rganishda keng qo‘llaniladi.

Mazkur usullarni kompleks qo‘llash orqali materialning kristall strukturasi, sirt morfologiyasi, nuqsonlari va elektron holatlari o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlash mumkin. Umuman olganda, mavjud ilmiy adabiyotlar yangi avlod funksional materiallarning energetik samaradorligi ularning faqat bitta fizik parametri bilan emas, balki kristall tuzilish, elektron energetik holatlar, optik yutilish, zaryad tashuvchilar transporti, fononlar dinamikasi va interfeys xususiyatlarining o‘zaro ta’siri bilan belgilanadi, degan xulosaga kelish imkonini beradi. Shu sababli qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalari uchun materiallar yaratishda kompleks fizik yondashuv zarur. Tahlil qilingan manbalarda perovskitlar, termoelektrik birikmalar, 2D materiallar, nanostrukturalar va yuqori entropiyali materiallarning katta istiqbolga ega ekanligi ko‘rsatilgan bo‘lsa-da, ularning uzoq muddatli barqarorligi, ekologik xavfsizligi, katta hajmda ishlab chiqarish texnologiyasi va iqtisodiy samaradorligi bilan bog‘liq masalalar hali to‘liq yechilmagan. Demak, kelgusidagi tadqiqotlarda materiallarning mikroskopik fizik xususiyatlarini chuqur o‘rganish bilan bir qatorda ularni real energetik sharoitlarda sinovdan o‘tkazish va kompleks optimallashtirish muhim ilmiy vazifa bo‘lib qoladi.

**Tadqiqot metodologiyasi.** Tadqiqotda kondensirlangan holat fizikasi va materialshunoslikka oid ilmiy manbalarni tizimli tahlil qilish, qiyosiy tahlil, nazariy fizik modellashtirish hamda materiallarning strukturaviy va fizik parametrlarini o‘zaro bog‘lash usullaridan foydalanildi. Materiallarning elektron tuzilishini o‘rganishda zichlik funksionali nazariyasi (DFT), fonon xususiyatlarini baholashda panjara dinamikasi, energiya transportini tahlil qilishda elektron va fonon transport modellari muhim metodologik asos sifatida qaraladi. Hisoblash materialshunosligida DFT, elektron transport modellashtirish va fonon hisoblari yangi termoelektrik materiallarni izlashda qo‘llanilayotgan asosiy usullar qatoriga kiradi.

Funksional materiallarning kondensirlangan holat fizikasi. Kondensirlangan holat fizikasi qattiq va suyuq moddalarning makroskopik xususiyatlarini ularning mikroskopik tuzilishi bilan bog‘lab o‘rganadi. Qayta tiklanuvchi energetika uchun materiallarni yaratishda ayniqsa qattiq jismlarning elektron tuzilishi, kristall panjarasi, fononlari va nuqsonlari muhim hisoblanadi.

Kristall materiallarda atomlarning davriy joylashuvi elektronlarning energetik zonalarini shakllantiradi. Elektronlarning valent zona va o‘tkazuvchanlik zonasi orasidagi energetik farq taqiqlangan zona kengligi sifatida ifodalanadi:

$$E_g=E_c-E_v$$

bu yerda $E_c$ — o‘tkazuvchanlik zonasining tubi, $E_v$ — valent zonasining yuqori chegarasi.

Quyosh elementlarida $E_g$ qiymati materialning quyosh spektrini yutish qobiliyatini belgilaydi. Termoelektrik materiallarda esa elektron energetik tuzilma elektr o‘tkazuvchanlik va Seebeck koeffitsiyentiga bevosita ta’sir qiladi.

Perovskit materiallarning fizik xususiyatlari. Perovskitlar yangi avlod funksional materiallarning eng faol o‘rganilayotgan guruhlaridan biridir. Ularning umumiy kristall strukturasi ko‘pincha $ABX_3$ ko‘rinishida ifodalanadi. Tarkibdagi ionlarni almashtirish orqali materialning strukturaviy va elektron xususiyatlarini boshqarish mumkin. Perovskitlarning turli energetik qurilmalarda qo‘llanilishi ularning elektr, optik va boshqa fizik xususiyatlarining moslashuvchanligi bilan bog‘liq. Quyosh fotoelektrik qurilmalarida metall-galogenid perovskitlar yuqori optik yutilish, sozlanadigan energetik zona va samarali zaryad tashish xususiyatlari sababli katta qiziqish uyg‘otmoqda. 2026-yilgi sharhlarda perovskitlarning fotovoltaika bilan bir qatorda kataliz, energiya saqlash va optoelektronikadagi imkoniyatlari ham ta’kidlangan. Shu bilan birga, namlik, issiqlik va yorug‘lik ta’siridagi degradatsiya, katta maydonli ishlab chiqarish va qo‘rg‘oshin bilan bog‘liq ekologik masalalar asosiy muammolar sifatida qayd etiladi. Perovskitlarning muhim xususiyatlaridan biri ularning tarkibiy muhandislikka mosligidir. A, B yoki X pozitsiyalaridagi ionlarni qisman almashtirish orqali kristall panjara parametrlari, taqiqlangan zona, zaryad tashuvchilar dinamikasi va barqarorlikni o‘zgartirish mumkin.

Termoelektrik materiallarning kondensirlangan holat fizikasi. Termoelektrik materiallar harorat gradientini bevosita elektr kuchlanishiga aylantirish imkonini beradi. Bu hodisa Seebeck effekti asosida amalga oshadi.

Termoelektrik samaradorlikning asosiy ko‘rsatkichi:

$$ZT=\frac{S^2\sigma T}{\kappa}$$

bu yerda:

−$S$— Seebeck koeffitsiyenti;

−$\sigma$— elektr o‘tkazuvchanlik;

−$T$— mutlaq harorat;

−$\kappa$— issiqlik o‘tkazuvchanligi.

Yuqori samarali termoelektrik materialda katta Seebeck koeffitsiyenti va elektr o‘tkazuvchanlik bilan birga past issiqlik o‘tkazuvchanligi talab etiladi. Shu sababli elektron va fonon transportini bir vaqtda boshqarish kondensirlangan holat fizikasining muhim

masalalaridan biridir. Nanostrukturaga o‘tish orqali fononlarning tarqalishini kuchaytirish va panjaraviy issiqlik o‘tkazuvchanligini kamaytirish mumkin. Shu bilan birga, elektron transportini saqlab qolish yoki yaxshilash uchun materialning elektron energetik tuzilmasini optimallashtirish talab etiladi. Metall-galogenid perovskitlar ham termoelektrik materiallar sifatida qiziqish uyg‘otmoqda. Ularning past issiqlik o‘tkazuvchanligi va yuqori Seebeck koeffitsiyentiga ega bo‘lish imkoniyati ushbu materiallarni istiqbolli yo‘nalishga aylantiradi. Biroq nazariy jihatdan kutilgan va tajribada olingan ZT qiymatlari o‘rtasidagi tafovut hali ham muhim ilmiy muammo bo‘lib qolmoqda.

Nanostrukturali materiallarning fizik xususiyatlari. Materiallarning o‘lchami nanometr diapazoniga kamaytirilganda ularning fizik xususiyatlari sezilarli ravishda o‘zgarishi mumkin. Bunga kvant o‘lcham effektlari, sirt-hajm nisbati ortishi, fononlarning chegaraviy sochilishi va elektronlarning fazoviy chegaralanishi sabab bo‘ladi.

Nanostrukturali materiallarda:

- optik yutilish kuchayishi;
- elektron energetik sathlarining o‘zgarishi;
- fononlarning sochilishi;
- issiqlik o‘tkazuvchanligining kamayishi;
- katalitik faollikning ortishi

kabi effektlar kuzatilishi mumkin.

Ushbu xususiyatlar quyosh elementlari, termoelektrik generatorlar, akkumulyatorlar va superkondensatorlarda material samaradorligini oshirish uchun qo‘llanilishi mumkin.

Yuqori entropiyali funksional materiallar. Yangi avlod materialshunosligining istiqbolli yo‘nalishlaridan biri — yuqori entropiyali materiallarni yaratishdir. Bunday materiallarda bir nechta asosiy elementlarning bir kristall strukturada kombinatsiyasi amalga oshiriladi. Yuqori entropiyali perovskit oksidlarida tarkibiy elementlarning ko‘pligi kristall strukturadagi lokal buzilishlar, elektron holatlar va fonon transportiga ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Bunday materiallar energiya saqlash va konversiya tizimlarida, jumladan dielektrik energiya saqlash qurilmalarida tadqiq qilinmoqda. Yuqori entropiyali materiallarning muhim afzalligi — tarkibni keng diapazonda boshqarish orqali kerakli fizik xususiyatlarni kombinatsiyalash imkoniyatidir. Biroq ularning termodinamik barqarorligi, fazalar shakllanishi va ishlab chiqarish texnologiyalarini chuqur o‘rganish zarur.

**Yangi avlod funksional materiallarning qiyosiy tahlili**

| Material turi | Asosiy fizik xususiyat | Energetik qo‘llanish | Asosiy muammo |
|---|---|---|---|
| Perovskitlar | Yuqori optik yutilish, sozlanadigan bandgap | Quyosh elementlari | Barqarorlik |
| Termoelektrik materiallar | Seebeck effekti | Chiqindi issiqlikdan energiya olish | Elektr va issiqlik transportini muvozanatlash |
| 2D materiallar | Kuchli sirt va kvant effektlari | Fotoelektrik va nanoenergetika | Katta maydonli ishlab chiqarish |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Yuqori entropiyali materiallar | Tarkibiy va strukturaviy moslashuvchanlik | Energiya saqlash/konversiya | Sintez va faza nazorati |
| Funksional oksidlar | Termik va kimyoviy barqarorlik | Termoelektrik, katalitik tizimlar | Yuqori haroratda transportni optimallashtirish |
| Nanokompozitlar | Interfeys va fonon muhandisligi | Batareya, termoelektrik va PV | Interfeyslarni nazorat qilish |

Materiallarning strukturasi va energetik samaradorlik o‘rtasidagi bog‘liqlik. Kondensirlangan holat fizikasining eng muhim masalalaridan biri materialning mikroskopik tuzilishi bilan uning makroskopik xususiyatlari o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniqlashdir. Kristall panjaradagi nuqsonlar ayrim holatlarda zaryad tashuvchilarni tutib qoluvchi markaz sifatida faoliyat yuritib, rekombinatsiyani kuchaytiradi. Natijada quyosh elementining kuchlanishi va tok zichligi kamayishi mumkin. Boshqa tomondan, nazorat qilinadigan doping va interfeys muhandisligi elektron transportini yaxshilash imkonini beradi. Termoelektrik materiallarda esa nuqsonlar va nanostrukturalar fononlarning sochilishini kuchaytirib, issiqlik o‘tkazuvchanligini kamaytirishi mumkin. Demak, nuqsonlar har doim ham salbiy omil emas; ularni boshqarish orqali materialning kerakli funksional xususiyatini shakllantirish mumkin.

**Natijalar va muhokama.** O‘tkazilgan nazariy tahlil shuni ko‘rsatadiki, yangi avlod funksional materiallarning energetik samaradorligini oshirish uchun ularning elektron, fonon, optik va strukturaviy xususiyatlarini kompleks boshqarish talab etiladi. Birinchidan, quyosh fotoelektrik qurilmalarida materialning bandgap qiymati, optik yutilishi va zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasi asosiy parametrlar hisoblanadi. Perovskit materiallarda tarkibiy muhandislik orqali energetik zona parametrlarini o‘zgartirish imkoniyati ularning fotovoltaik qurilmalar uchun istiqbolini oshiradi. Zamonaviy tadqiqotlarda perovskit va tandem quyosh elementlari yuqori samaradorlik va nisbatan past ishlab chiqarish xarajati nuqtayi nazaridan muhim yo‘nalish sifatida ko‘rsatilmoqda. Ikkinchidan, termoelektrik materiallarda asosiy vazifa elektr o‘tkazuvchanlikni saqlagan holda issiqlik o‘tkazuvchanligini kamaytirishdan iborat. Buning uchun nanostrukturaga keltirish, qotishma hosil qilish, nuqsonlar muhandisligi va fonon spektrini boshqarish usullaridan foydalanish mumkin. Uchinchidan, materiallarni bir nechta funksiyaga ega qilib loyihalash kelajak energetikasining muhim yo‘nalishidir. Masalan, energiyani bir vaqtning o‘zida ishlab chiqarish va saqlash imkonini beruvchi integratsiyalashgan qurilmalar tizimning umumiy samaradorligini oshirishi mumkin. Perovskit asosidagi fotozaryadlanuvchi batareya va superkondensatorlar bo‘yicha tadqiqotlar bunday integratsiya konsepsiyasining istiqbolini ko‘rsatadi. To‘rtinchidan, yuqori entropiyali va ko‘p komponentli materiallar funksional parametrlarni keng diapazonda sozlash imkonini beradi. Kelajakda sun’iy intellekt, yuqori unumli hisoblash va DFT asosidagi materiallar dizaynini tajribaviy sintez bilan birlashtirish yangi energetik materiallarni tezroq aniqlashga yordam berishi mumkin.

**Xulosa.** Qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalarining kelajakdagi rivojlanishi yangi avlod funksional materiallarning fizik xususiyatlarini chuqur tushunish va boshqarishga

bevosita bog‘liq. Kondensirlangan holat fizikasi materiallarning kristall tuzilishi, elektron energetik zonalari, fononlari, nuqsonlari va interfeyslarini o‘rganish orqali ularning energetik qurilmalardagi funksional xususiyatlarini tushuntirish imkonini beradi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, perovskitlar yuqori optik-elektron xususiyatlari va tarkibiy moslashuvchanligi sababli fotovoltaik va termoelektrik qurilmalar uchun istiqbolli materiallardan biridir. Nanostrukturali materiallar fonon va elektron transportini boshqarish imkonini berishi bilan ajralib turadi. Yuqori entropiyali materiallar esa ko‘p komponentli kristall struktura orqali yangi fizik xususiyatlarni shakllantirish imkoniyatini beradi.

**Foydalanilgan adabiyotlar**

1. Green M.A., Ho-Baillie A., Snaith H.J. The emergence of perovskite solar cells // *Nature Photonics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 506–514.
2. Polman A., Knight M., Garnett E.C., Ehrler B., Sinke W.C. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges // *Science*. – 2016. – Vol. 352.
3. Goel P., Sundriyal S., Shrivastav V., et al. Perovskite materials as superior and powerful platforms for energy conversion and storage applications // *Nano Energy*. – 2021. – Vol. 80. – 105552.
4. Rogach A.L. et al. Metal Halide Perovskites as Emerging Thermoelectric Materials // *ACS Energy Letters*. – 2021. – Vol. 6, No. 11. – P. 3882–3905.
5. Zhang L., Miao J., Li J., Li Q. Halide Perovskite Materials for Energy Storage Applications // *Advanced Functional Materials*. – 2020. – Vol. 30. – 2003653.
6. Wang C. et al. High-Entropy Perovskites for Energy Conversion and Storage: Design, Synthesis, and Potential Applications // *Small Methods*. – 2023. – 2201138.
7. Jia Z., Cheng C., Chen X., et al. Applications of all-inorganic perovskites for energy storage // *Materials Advances*. – 2023. – Vol. 4. – P. 79–104.
8. Jiang Q., Zhu K. Rapid advances enabling high-performance inverted perovskite solar cells // *Nature Reviews Materials*. – 2024. – Vol. 9. – P. 399–419.
9. Anwar N. et al. Future directions and emerging trends of sustainable energy harvesting: innovations in photovoltaic and thermoelectric systems // *RSC Advances*. – 2026. – Vol. 16. – P. 17725–17744.
10. Maiti T., Saxena M., Roy P. Double perovskite ($Sr_2B'B''O_6$) oxides for high-temperature thermoelectric power generation—A review // *Journal of Materials Research*. – 2019. – Vol. 34. – P. 107–125.
11. Gutiérrez Moreno J.J., Cao J., Fronzi M., et al. A review of recent progress in thermoelectric materials through computational methods // *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. – 2020. – Vol. 9.