

QUYOSH ENERGETIKASIDA TOKSIK MATERIALLARNI (Pb, Cd)
ALMASHTIRISH STRATEGIYALARI VA ALTERNATIV MATERIALLAR

Bo'riyeva Muhabbat Mamayusuf qizi

madinammm2022@gmail.com

Termiz Davlat Universiteti

Annotatsiya Ushbu maqolada quyosh energetikasida qo'rg'oshin (Pb) va kadmiy (Cd) kabi toksik elementlarni almashtirish strategiyalari hamda ekologik xavfsiz alternativ materiallar tahlil qilinadi. Pb asosan perovskit quyosh elementlarida, Cd esa CdTe quyosh elementlari va ayrim yupqa qatlamli texnologiyalardagi CdS bufer qatlamlarida uchraydi. Bu elementlar yuqori fotovoltaik samaradorlikka ega materiallar tarkibida ishlatilsa-da, ularning toksikligi, utilizatsiya muammolari va ekologik xavfi barqaror energetika tamoyillariga zid keladi. Shu sababli kesteritlar, qo'rg'oshinsiz perovskitlar, vismut va surma asosidagi birikmalar, metall oksidlari, organik yarimo'tkazgichlar hamda Cd-free bufer qatlamlar istiqbolli alternativalar sifatida o'rganilmoqda.

Kalit so'zlar: quyosh energetikasi, toksik materiallar, qo'rg'oshin, kadmiy, perovskit, CdTe, kesterit, ekologik xavfsizlik, yarimo'tkazgich materiallar.

Kirish Quyosh energetikasi qayta tiklanuvchi energiyaning eng muhim yo'nalishlaridan biridir. Quyosh elementlari elektr energiyasini ishlab chiqarishda karbonat angidrid chiqarmaydi, shuning uchun ular ekologik toza texnologiya sifatida baholanadi. Biroq bu baho to'liq bo'lishi uchun quyosh panellarida ishlatiladigan materiallar ham ekologik xavfsiz bo'lishi kerak. Aynan shu nuqtada Pb va Cd kabi toksik elementlar muammosi yuzaga keladi.

Qo'rg'oshinli perovskitlar yuqori yorug'lik yutish qobiliyati va yuqori samaradorligi sababli juda ko'p o'rganilmoqda. Ammo Pb ning toksikligi sababli bunday quyosh elementlari shikastlanganda yoki noto'g'ri utilizatsiya qilinganda atrof-muhitga xavf tug'dirishi mumkin. Kadmiy esa CdTe quyosh elementlarida va kesterit quyosh elementlaridagi CdS bufer qatlamlarda ishlatiladi. Cd ham toksik element bo'lib, ishlab chiqarish va chiqindi boshqaruvida qat'iy nazorat talab qiladi.

Demak, masalaning mohiyati shuki: quyosh elementi samarali bo'lishi bilan birga xavfsiz, qayta ishlanadigan, kamyob bo'lmagan va sanoatga mos bo'lishi kerak. Faqat "yuqori samaradorlik" yetarli mezon emas. Material ekologik xavfsizlik va hayotiy sikl tahlilidan ham o'tishi kerak.

Pb va Cd ni almashtirish zarurati

Pb va Cd ni almashtirishning asosiy sabablari quyidagilar:

Birinchi, bu elementlar toksikdir. Ular tuproq, suv va tirik organizmlarda to'planishi mumkin. Ikkinchi, quyosh panellari 20–30 yil xizmat qilgandan keyin ularni utilizatsiya qilish masalasi keskinlashadi. Uchinchi, kelajakda quyosh panellari hajmi juda katta miqyosga yetadi, shuning uchun toksik moddalarning oz miqdori ham umumiy miqyosda jiddiy ekologik xavfga aylanishi mumkin.

Shuningdek, ayrim Cd yoki Pb asosidagi texnologiyalar yuqori samarador bo'lsa-da, ularni ommaviy qo'llash uchun "yopiq ishlab chiqarish — xavfsiz ekspluatatsiya — qayta ishlash" zanjiri to'liq ishlashi kerak. Bu esa hamma davlatlarda bir xil darajada kafolatlanmagan.

Asosiy almashtirish strategiyalari

Pb va Cd ni almashtirishda bir nechta strategiya mavjud.

Birinchi strategiya — toksik elementni bevosita boshqa element bilan almashtirish. Masalan, perovskitlarda Pb o'rniga Sn, Ge, Bi yoki Sb ishlatish. Tin-based, ya'ni qalay asosidagi perovskitlar Pb ga eng yaqin elektron tuzilishga ega bo'lgani uchun ko'p o'rganiladi. Ammo Sn^{2+} oson oksidlanib Sn^{4+} ga aylanishi mumkin, bu esa material barqarorligini pasaytiradi.

Ikkinchi strategiya — butun absorber materialni almashtirish. Masalan, Pb-perovskit yoki CdTe o'rniga kesterit $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ yoki $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ materiallaridan foydalanish. Kesteritlar Cu, Zn, Sn, S, Se kabi nisbatan ko'p uchraydigan elementlardan tashkil topadi. Kesterit yupqa qatlamli quyosh elementlari ekologik xavfsiz, yerda ko'p uchraydigan va arzon texnologiya sifatida ko'riladi, ammo samaradorlikni oshirish hali asosiy muammo bo'lib qolmoqda.

Uchinchi strategiya — CdS bufer qatlamni Cd-free material bilan almashtirish. Kesterit quyosh elementlarida CdS keng qo'llanadi, lekin uning toksikligi va ba'zi optik yo'qotishlari bor. Tadqiqotlarda $\text{Zn}(\text{O},\text{S})$, ZnSnO , In_2S_3 , TiO_2 va SnO_2 kabi Cd-free bufer qatlamlar istiqbolli deb qaralmoqda. 2024-yilgi sharhda CdS kesteritlarda standart bufer bo'lsa-da, toksikligi, xavfli chiqindi hosil qilishi va band moslashuvi ideal emasligi ta'kidlangan.

To'rtinchi strategiya — toksik modda butunlay olib tashlanmaguncha, uning sizib chiqishini cheklash. Bu "mitigation", ya'ni xavfni kamaytirish strategiyasi. Masalan, perovskit panellarida Pb ni kapsulyatsiya qilish, Pb ni yutuvchi qatlamlar qo'shish, shikastlanganda Pb sizishini kamaytiruvchi polimer yoki fosfat qatlamlar ishlatish mumkin. Biroq bu yechim almashtirish emas, vaqtinchalik xavfni kamaytirishdir.

Alternativ materiallar

Qo'rg'oshinsiz perovskitlar Pb ni almashtirishning eng faol o'rganilayotgan yo'nalishidir. Bu guruhga Sn, Ge, Bi va Sb asosidagi perovskitlar kiradi. Sn asosidagi perovskitlarning afzalligi shundaki, ularning elektron tuzilishi Pb ga yaqin. Kamchiligi

esa oksidlanishga sezgirli. Bi va Sb asosidagi perovskitga o'xshash materiallar past toksiklik, nisbatan yaxshi kimyoviy barqarorlik va mavjud resurslar sababli qiziqish uyg'otmoqda. Surma asosidagi perovskitga o'xshash materiallar yuqori kimyoviy barqarorligi, past toksikligi va nisbatan keng resurs bazasi sababli istiqbolli deb ko'rilmoqda.

Kesteritlar Cd va Pb muammosiga nisbatan kuchli alternativadir. Ular tarkibida juda toksik Pb yoki Cd yo'q, xomashyo nisbatan arzon va ko'p uchraydi. Ammo kesteritlarda kristall nuqsonlar, ikkilamchi fazalar va interfeys muammolari samaradorlikni cheklaydi. Shu sababli kesterit texnologiyasi uchun asosiy yo'l — nuqsonlar kimyosini boshqarish, donachalar o'sishini yaxshilash va Cd-free bufer qatlamlar bilan mos interfeys yaratishdir.

Metall oksidlari ham muhim alternativ hisoblanadi. TiO₂, ZnO, SnO₂ va NiO kabi oksidlar quyosh elementlarida elektron yoki teshik transport qatlamlari sifatida ishlatiladi. Ular odatda arzon, nisbatan xavfsiz va barqaror. Ammo absorber sifatida ularning hammasi ham yuqori samaradorlik bermaydi.

Organik yarimo'tkazgichlar va polimer quyosh elementlari ham ekologik xavfsizlik bo'yicha qiziqarli yo'nalishdir. Ular past haroratda, egiluvchan va yengil shaklda olinishi mumkin. Kamchiligi — uzoq muddatli barqarorlik va samaradorlik muammosi.

Jadval. Pb va Cd ni almashtirish uchun alternativ materiallar

Muammo	Almashtirish strategiyasi	Alternativ materiallar	Afzalliklari	Asosiy muammosi
Pb-perovskit absorberlar	Pb ni Sn, Ge, Bi, Sb bilan almashtirish	Sn-perovskit, Bi/Sb perovskitga o'xshash materiallar	Pb toksikligi kamayadi, yuqori yutish qobiliyati saqlanishi mumkin	Sn oksidlanadi, Bi/Sb materiallar samaradorligi pastroq
CdTe absorber	CdTe o'rniga ekologik xavfsiz absorber tanlash	Kesterit CZTS, CZTSSe, Cu ₂ O, organik absorberlar	Yerda ko'p uchraydigan elementlar, toksiklik pastroq	Samaradorlik CdTe yoki Si darajasiga yetishi qiyin
CdS bufer qatlam	Cd-free bufer ishlatish	Zn(O,S), ZnSnO, In ₂ S ₃ , TiO ₂ , SnO ₂	Cd yo'q, optik yo'qotish	Interfeys mosligi va barqarorlikni

Muammo	Almashtirish strategiyasi	Alternativ materiallar	Afzalliklari	Asosiy muammosi
			kamayishi mumkin	optimallashtirish kerak
Keng miqyosdagi toksik chiqindi xavfi	Kapsulyatsiya va qayta ishlash	Pb-yutuvchi qatlamlar, barqaror polimer kapsulyantlar, recycling tizimlari	Qisqa muddatda xavfni kamaytiradi	Toksik element muammosi to'liq yo'qolmaydi
Kamyob elementlar muammosi	Yerda ko'p uchraydigan elementlarga o'tish	Cu, Zn, Sn, Fe, S, O asosidagi materiallar	Arzonlik va resurs xavfsizligi	Material sifatini boshqarish qiyin
Barqarorlik muammosi	Gibrid/tandem va himoya qatlamlari	Si-kesterit, Si-perovskit, oksid transport qatlamlar	Samaradorlik va xizmat muddati oshishi mumkin	Ishlab chiqarish murakkablashadi

Muhokama

Pb va Cd ni almashtirishdagi eng asosiy savol: alternativ materiallar amalda yetarlicha samaralimi? Hozircha klassik kremniy texnologiyasi eng ishonchli va ekologik jihatdan nisbatan xavfsiz yo'l bo'lib qolmoqda. Lekin kremniy panellarini ishlab chiqarish energiya talab qiladi va moslashuvchan yupqa qatlamli texnologiyalar uchun har doim ham ideal emas.

Kesteritlar ekologik xavfsizlik nuqtai nazaridan juda kuchli nomzod, lekin samaradorlik masalasi hali hal qilinmagan. Kesteritlarning muammosi shundaki, tarkibidagi Cu, Zn va Sn ionlari o'xshash o'lcham va zaryad xususiyatlari sababli kristall panjarada joy almashishi mumkin. Bu esa nuqsonlar hosil qiladi va zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasini kuchaytiradi.

Qo'rg'oshinsiz perovskitlar nazariy jihatdan juda yaxshi ko'rinadi, ammo barqarorlik katta muammo. Sn asosidagi perovskitlarda oksidlanish, Bi/Sb asosidagi tizimlarda esa past o'lchamli kristall struktura va zaryad tashish cheklovlari mavjud. Shuning uchun bu yo'nalishda faqat element almashtirish yetarli emas; kristall muhandisligi, sirt passivatsiyasi va himoya qatlamlari ham zarur.

Cd-free bufer qatlamlar esa eng yaqin amaliy yechimlardan biridir. Chunki butun quyosh elementi texnologiyasini almashtirmasdan, faqat CdS bufer qatlamni

xavfsizroq material bilan almashtirish mumkin. Bu sanoatga o'tish uchun realistik strategiya. Lekin yangi bufer qatlam absorber bilan energetik jihatdan mos bo'lishi kerak, aks holda samaradorlik pasayadi.

Xulosa

Quyosh energetikasida Pb va Cd ni almashtirish ekologik xavfsizlik uchun zarur, lekin bu masala oddiy "bitta elementni boshqasiga almashtirish" darajasida hal bo'lmaydi. Har bir alternativ material samaradorlik, barqarorlik, narx, resurs mavjudligi, toksiklik va qayta ishlash imkoniyati bo'yicha baholanishi kerak.

Eng istiqbolli yo'nalishlar sifatida kesteritlar, qo'rg'oshinsiz perovskitlar, Bi/Sb asosidagi perovskitga o'xshash materiallar, organik yarimo'tkazgichlar va metall oksid qatlamlarini ko'rsatish mumkin. Kesteritlar ekologik xavfsiz va arzon bo'lsa-da, samaradorlikni oshirish talab qilinadi. Qo'rg'oshinsiz perovskitlar yuqori ilmiy salohiyatga ega, ammo barqarorlik va real qurilma samaradorligi hali kuchaytirilishi kerak. Cd-free bufer qatlamlar esa yaqin muddatda amaliy qo'llash uchun eng real strategiyalardan biri hisoblanadi.

Kelajakdagi asosiy yo'l — toksik elementlarni kamaytirish, yerda ko'p uchraydigan elementlarga asoslangan materiallar yaratish, panel xizmat muddati tugagach qayta ishlash tizimini yo'lga qo'yish va materiallarning hayotiy siklini to'liq baholashdir. Aks holda quyosh energetikasi energiya ishlab chiqarishda "yashil" bo'lsa ham, materiallar va chiqindilar bosqichida ekologik muammoli bo'lib qolishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Umarov B.B. **Fizik kimyo**. Toshkent: O'zbekiston milliy ensiklopediyasi, 2017.
2. To'rayev X.X. **Materialshunoslik asoslari**. Toshkent: Fan va texnologiya, 2021.
3. Karimov B.K. **Zamonaviy materiallar kimyosi**. Toshkent: Innovatsiya, 2022.
4. Mirkomilov T.M., Raximov H.R. **Umumiy va noorganik kimyo**. Toshkent: O'qituvchi, 2016.
5. Tseberlidis G. va boshqalar. **Cd-free kesterite solar cells: State-of-the-art and perspectives**. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024.
6. Ahmad N. va boshqalar. **Cadmium-Free Buffer Layer Materials for Kesterite Thin-Film Solar Cells**. Energies, 2025.
7. Nazligul A.S. va boshqalar. **Recent Development in Earth-Abundant Kesterite Materials and Their Applications**. Sustainability, 2020.
8. Xu J. va boshqalar. **Lead-free solar cells and modules with antimony-based perovskite-inspired materials**. 2025.