



TiO₂ PARDASIMON FOTOELEKTRIK VA Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ TERMoeLEKTRIK YARIMO' TKAZGICH STRUKTURALARIDA ISSIQLIK-ELEKTR TRANSPORTI HODISASINI TAHLIL QILISH

¹Atajonov Muxiddin Odiljonovich va ²Jahonova Zarina

¹Andijon davlat texnika instituti. ²Mustaqil izlanuvchi

Email: atajonovmuhiddin80@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu tadqiqotda TiO₂ pardasimon fotoelektrik qatlam hamda Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ termoelektrik yarimo' tkazgich strukturalarida issiqlik va elektr transporti hodisalari kompleks tahlil qilindi. Fotoelektrik qatlamda fotogeneratsiyalangan zaryad tashuvchilarning hosil bo'lishi, diffuziyasi va rekombinatsiyasi, termoelektrik qismda esa harorat gradienti ta'sirida yuzaga keluvchi Seebeck effekti o'rganildi. Issiqlik oqimi, harorat taqsimoti, elektr potensial va tok zichligi o'rtasidagi bog'lanishlar baholandi. TiO₂ va Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ qatlamlarining termofizik hamda elektr parametrlarining umumiy energiya konversiyasiga ta'siri aniqlandi. Natijalar gibrid foto-termoelektrik tizimlarda issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish, zaryad tashuvchilar transportini yaxshilash va chiqish quvvatini oshirish uchun strukturaviy optimallashtirish yo'nalishlarini belgilash imkonini beradi. Shuningdek, kontakt qarshiliklari va qatlamlararo issiqlik uzatish samaradorligining qurilma barqarorligiga ta'siri hisobga olindi.

Kalit so'zlar: TiO₂ yupqa parda; Bi₂Te₃/Sb₂Te₃; yarimo' tkazgich struktura; issiqlik-elektr transporti; zaryad tashuvchilar; Seebeck effekti; harorat gradienti.

АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЙ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА В ПЛЁНОЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ TiO₂ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ Bi₂Te₃/Sb₂Te₃

Аннотация: В данном исследовании проведён комплексный анализ явлений тепло- и электропереноса в плёночном фотоэлектрическом слое TiO₂ и термоэлектрических полупроводниковых структурах Bi₂Te₃/Sb₂Te₃. В фотоэлектрическом слое изучены образование, диффузия и рекомбинация фотогенерированных носителей заряда, а в термоэлектрической части — эффект Зеебека, возникающий под действием градиента температуры. Оценены связи между тепловым потоком, распределением температуры, электрическим потенциалом и плотностью тока. Определено влияние теплофизических и электрических параметров слоёв TiO₂ и Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ на общее преобразование энергии. Результаты позволяют наметить направления структурной оптимизации для снижения тепловых потерь, улучшения переноса носителей заряда и повышения выходной мощности гибридных фототермоэлектрических систем. Также учтено влияние контактных сопротивлений и эффективности межслойной теплопередачи на стабильность устройства.

Ключевые слова: тонкая плёнка TiO₂; Bi₂Te₃/Sb₂Te₃; полупроводниковая структура; тепло- и электроперенос; носители заряда; эффект Зеебека; градиент температуры.

ANALYSIS OF HEAT AND ELECTRIC TRANSPORT PHENOMENA IN TiO₂ THIN-FILM PHOTOVOLTAIC AND Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR STRUCTURES

Abstract: In this study, heat and electric transport phenomena in a TiO₂ thin-film photovoltaic layer and Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ thermoelectric semiconductor structures were analysed in a comprehensive way. The generation, diffusion and recombination of photogenerated charge carriers were studied in the photovoltaic layer, while the Seebeck effect arising under a temperature gradient was examined in the thermoelectric part. The relationships between heat flow, temperature distribution, electric potential and current density were evaluated. The influence of the thermophysical and electrical parameters of the TiO₂ and Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ layers on the overall energy conversion was determined. The results make it possible to define directions of structural optimisation for reducing heat losses, improving charge-carrier transport and increasing the output power of hybrid photo-thermoelectric systems. The effect of contact resistances and of the efficiency of interlayer heat transfer on device stability was also taken into account.

Keywords: TiO₂ thin film; Bi₂Te₃/Sb₂Te₃; semiconductor structure; heat and electric transport; charge carriers; Seebeck effect; temperature gradient.

1. Kirish

Quyosh energiyasini elektr energiyasiga samarali aylantirish zamonaviy yarimo' tkazgichlar fizikasi va qayta tiklanuvchi energetikaning muhim ilmiy yo'nalishlaridan biridir. Fotoelektrik energiya o'zgartirgichlarda tushayotgan

quyosh nurlanishining faqat ma'lum qismi elektr energiyasiga aylantiriladi, qolgan qismi esa yutilish, tashuvchilar rekombinatsiyasi va boshqa relaksatsion jarayonlar natijasida issiqlik ko' rinishida ajraladi. Shu sababli yarimo' tkazgich strukturalarida optik yutilish, zaryad tashuvchilar transporti va issiqlik uzatilishini o' zaro bog' liq holda tadqiq etish energiya konversiyasi samaradorligini oshirish uchun muhim hisoblanadi [1, 2].

TiO₂ yuqori kimyoviy barqarorligi, optoelektron xususiyatlari va yupqa pardalar hosil qilish imkoniyati tufayli fotoelektrik va fotoelektrokimyoviy qurilmalarda keng tadqiq etiladigan n-turdagi yarimo' tkazgichlardan biridir. TiO₂ asosidagi strukturalarning elektr xususiyatlari fotogeneratsiyalangan elektron va kovaklarning hosil bo' lishi, ularning diffuziya va drift harakati, tutib qolinish holatlari hamda rekombinatsiya jarayonlari bilan belgilanadi [5]. Ayniqsa, kristall tuzilish, nuqsonlar, donalararo chegaralar va sirt holatlari zaryad tashuvchilarning harakatchanligi hamda elektron transport samaradorligiga sezilarli ta'sir ko' rsatadi.

Fotoelektrik qatlamda hosil bo' ladigan ortiqcha issiqlikni qo' shimcha elektr energiyasiga aylantirish uchun termoelektrik yarimo' tkazgichlardan foydalanish istiqbolli yondashuv hisoblanadi [1, 5, 10]. Xususan, Bi₂Te₃ va Sb₂Te₃ hamda ular asosidagi qattiq eritmalar xona haroratiga yaqin diapazonda yuqori termoelektrik xususiyatlarga ega materiallar sifatida keng qo' llaniladi. Termoelektrik energiya konversiyasi harorat gradienti ta'sirida zaryad tashuvchilarning qayta taqsimlanishi va Seebeck kuchlanishining hosil bo' lishiga asoslanadi. Ushbu materiallarning samaradorligi Seebeck koeffitsiyenti S, elektr o' tkazuvchanlik σ va issiqlik o' tkazuvchanlik κ orasidagi murakkab o' zaro bog' lanish bilan belgilanadi. Shu sababli elektr transportini yaxshilash bilan bir vaqtda fononlar orqali issiqlik uzatilishini kamaytirish yuqori termoelektrik samaradorlikka erishishning asosiy fizik shartlaridan biridir [5, 17,19].

TiO₂ fotoelektrik qatlami va Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ termoelektrik strukturasini yagona tizim nuqtai nazaridan qaralganda, energiya konversiyasi ikki o' zaro bog' langan transport mexanizmi orqali amalga oshadi. Birinchi mexanizm TiO₂ qatlamida fotonlarning yutilishi natijasida zaryad tashuvchilarning generatsiyasi va elektr transporti bilan, ikkinchisi esa qatamlar orasida yuzaga kelgan harorat farqi tufayli issiqlik oqimi va termoelektrik kuchlanish hosil bo' lishi bilan bog' liq. Bunda qatlamlarning issiqlik o' tkazuvchanligi, elektr qarshiligi, kontakt qarshiliklari, qalinligi va haroratga bog' liq material parametrlari butun strukturaning energetik xususiyatlarini belgilovchi asosiy omillarga aylanadi [2, 10].

Mavjud tadqiqotlarning katta qismi TiO₂ asosidagi fotoelektrik transport yoki Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ asosidagi termoelektrik transport jarayonlarini alohida o' rganishga qaratilgan. Biroq fotoelektrik qatlamda hosil bo' ladigan issiqlikning termoelektrik qismga uzatilishi, harorat maydonining zaryad transportiga ta'siri hamda elektr va issiqlik jarayonlarining o' zaro bog' langan holdagi tahlili gibrid strukturani optimallashtirish nuqtai nazaridan alohida ahamiyatga ega [5, 17].

Shu bois ushbu ishning maqsadi TiO₂ pardasimon fotoelektrik va Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ termoelektrik yarimo' tkazgich strukturalarida issiqlik hamda elektr transporti jarayonlarini o' zaro bog' langan holda tahlil qilish, harorat gradienti, issiqlik oqimi, elektr potensial, tok zichligi va zaryad tashuvchilar transporti orasidagi fizik bog' lanishlarni aniqlashdan iborat. Tadqiqot natijalari fotoelektrik qatlamda hosil bo' ladigan issiqlik energiyasidan qo' shimcha foydalanish hamda foto-termoelektrik yarimo' tkazgich strukturalarning energetik samaradorligini oshirish uchun ilmiy asos yaratishga yo' naltirilgan [10, 19].

2. MATERIALLAR VA TADQIQOT USULLARI

2.1. Gibrid yarimo' tkazgich strukturaning fizik modeli

Tadqiqot obyekti sifatida TiO₂ pardasimon fotoelektrik qatlam hamda n-turdagi Bi₂Te₃ va p-turdagi Sb₂Te₃ termoelektrik yarimo' tkazgich elementlaridan tashkil topgan gibrid struktura qaraldi [2, 3]. TiO₂ qatlamining asosiy vazifasi tushayotgan optik nurlanishni yutish va fotogeneratsiyalangan zaryad tashuvchilarning transportini ta'minlashdan iborat. Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ termoelektrik juftligi esa struktura bo' ylab hosil bo' lgan harorat gradientidan foydalanib, Seebeck effekti asosida elektr kuchlanishini hosil qiladi [5].

Hisoblash modeli COMSOL Multiphysics dasturiy muhitida Heat Transfer in Solids, Electric Currents va Thermoelectric Effect fizik modullarini o' zaro bog' lash asosida shakllantirildi.

2.2. TiO₂ qatlamida fotoelektrik transport

TiO₂ pardasida yorug' lik yutilishi natijasida elektron-kovak juftliklari hosil bo' ladi. Qatlam chuqurligi bo' yicha fotogeneratsiya tezligi Beer–Lambert qonuni bilan ifodalanadi [7]:

$$G(z, \lambda) = \alpha(\lambda) \Phi(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z}$$

bu yerda: G — zaryad tashuvchilarning generatsiya tezligi; α — TiO₂ ning yorug' likni yutish koeffitsiyenti; Φ — fotonlar oqimi; z — qatlam chuqurligi; λ — yorug' lik to' lqin uzunligi [8, 9].

TiO₂ qatlamidagi elektronlarning umumiy tok zichligi drift va diffuziya toklaridan tashkil topadi:

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \nabla n$$

bu yerda: q — elektron zaryadi; — elektronlarning harakatchanligi; n — elektronlar konsentratsiyasi; E — elektr maydon kuchlanganligi; — elektronlarning diffuziya koeffitsiyenti. $\mu_n D_n$

Zaryad tashuvchilar uchun uzluksizlik tenglamasi:

$$\nabla \cdot J_n = q(R - G)$$

ko' rinishda yoziladi.

bu yerda R — rekombinatsiya tezligi, G esa generatsiya tezligidir.

Demak, TiO_2 qatlamining elektr xususiyatlari zaryad tashuvchilarning generatsiyasi, rekombinatsiyasi, diffuziyasi va elektr maydon ta'siridagi harakati bilan belgilanadi [7, 10].

2.3. Issiqlik transporti

Strukturadagi harorat taqsimoti energiya saqlanish qonuni asosida aniqlandi:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q$$

bu yerda: ρ — material zichligi, kg/m^3 ; C_p — solishtirma issiqlik sig'imi, $J/(kg \cdot K)$; T — harorat, K ; q — issiqlik oqimi, W/m^2 ; Q — hajmiy issiqlik manbai, W/m^3 .

Oddiy issiqlik o' tkazuvchanlik Fourier qonuniga asosan:

$$q = -k \nabla T$$

ko' rinishda ifodalanadi.

bu yerda k — materialning issiqlik o' tkazuvchanlik koeffitsiyenti, $W/(m \cdot K)$.

Termoelektrik materialda esa issiqlik oqimiga zaryad tashuvchilar olib o' tadigan issiqlik ham qo' shiladi [11, 13]:

$$q = -k \nabla T + \Pi J$$

bu yerda Π — Peltier koeffitsiyenti. Peltier va Seebeck koeffitsiyentlari orasidagi bog' lanish:

$$\Pi = ST$$

ko' rinishda ifodalanadi.

2.4. Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 strukturada elektr transporti

Termoelektrik yarimo' tkazgichlarda tok zichligi elektr maydon va harorat gradientining birgalikdagi ta'siri bilan aniqlanadi [14]:

$$J = -\sigma(\nabla V + S \nabla T)$$

bu yerda: σ — elektr o' tkazuvchanlik, S/m ; V — elektr potensial, V ; S — Seebeck koeffitsiyenti, V/K ; ∇T — harorat gradienti, K/m .

Elektr zaryadining saqlanish qonuni: $\nabla \cdot J = 0$ shart bilan ifodalanadi [15].

Tok oqishi natijasida Joule issiqligi ham hosil bo' ladi:

$$Q_J = JE$$

bunda elektr maydon: orqali aniqlanadi. $E = -\nabla V$

Bi_2Te_3 va Sb_2Te_3 materiallarining termoelektrik samaradorligi odatda o' lchamsiz sifat ko' rsatkichi — ZT orqali baholanadi:

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

bu formuladan ko' rinadiki, termoelektrik material uchun yuqori Seebeck koeffitsiyenti va yuqori elektr o' tkazuvchanlik foydali, issiqlik o' tkazuvchanlikning past bo' lishi esa samaradorlikni oshiradi [16].

2.5. Harorat farqi va Seebeck kuchlanishi

Strukturaning issiq va sovuq tomonlari orasidagi harorat farqi:

$$\Delta T = T_{is} - T_s$$

orqali aniqlandi.

Bizning asosiy hisoblash holatimizda, shuning uchun: $T_{is} = 327.4 K$, $T_s = 304.3 K$

$$\Delta T = 327.4 - 304.3 K = 23.1 K$$

Termoelektrik juftlikda hosil bo' ladigan Seebeck kuchlanishi:

$$V_{TE} = (S_p - S_n) \Delta T$$

orqali baholanadi.

bu yerda: — p-turdagi Sb_2Te_3 ning Seebeck koeffitsiyenti; — n-turdagi Bi_2Te_3 ning Seebeck koeffitsiyenti. S_p, S_n

Masalan, agar: va bo' lsa, termoelektrik juftlikning umumiy Seebeck koeffitsiyenti: $S_p = +200 \mu V/K$, $S_n = -200 \mu V/K$

$$S_{TE} = S_p - S_n$$

$$S_{TE} = 200 - (-200) = 400 \mu V/K$$

bo' ladi.

$\Delta T = 23.1 K$ bo' lganda bitta termoelektrik juftlik uchun:

$$V_{TE} = 400 * 10^{-6} * 23.1$$

$$V_{TE} = 9.24 * 10^{-3}, V$$

ya'ni: $V_{TE} \approx 9.24$ mV hosil bo' ladi.

2.6. Sonli modellashtirish shartlari

TiO₂ qatlami yuzasiga tushuvchi quyosh nurlanish intensivligi quyidagi diapazonda o' zgartirildi:

$$G=200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$$

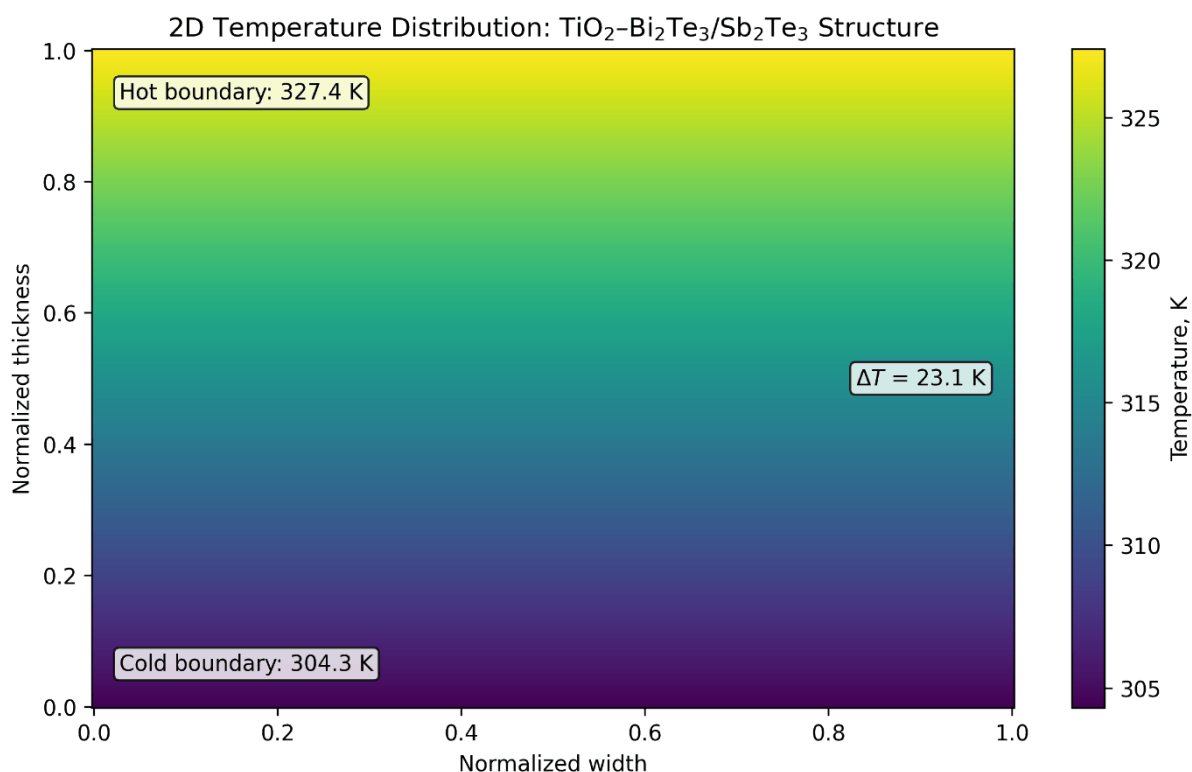
Hisoblash davomida quyidagi fizik kattaliklar aniqlandi: harorat taqsimoti $T(x,y,z)$; harorat gradienti ∇T ; issiqlik oqimi q ; elektr potensial V ; elektr maydon E ; tok zichligi J ; termoelektrik kuchlanish V_{TE} .

Shunday qilib, ishlab chiqilgan fizik model TiO₂ pardasidagi fotoelektrik transport, strukturadagi issiqlik tarqalishi va Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ termoelektrik elementlaridagi Seebeck transportini o' zaro bog' langan holda tahlil qilish imkonini beradi.

3. NATIJALAR VA MUHOKAMA

3.1. Harorat maydonining taqsimlanishi

TiO₂-Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ yarimo' tkazgich strukturasi issiqlik-elektr xususiyatlarini sonli tahlil qilish natijasida struktura bo' ylab barqaror harorat gradienti shakllanishi aniqlandi [7, 8]. Hisoblash shartlariga ko' ra, strukturaning issiq chegarasidagi maksimal harorat 327.4 K, sovuq chegarasidagi minimal harorat esa 304.3 K ni tashkil etdi. Natijada umumiy harorat farqi 23.1 K ga teng bo' ldi.



1-rasm. TiO₂-Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ strukturasi 2D harorat maydonining taqsimlanishi

2D harorat maydoni yuqori haroratli sohadan sovuq chegara tomon uzluksiz pasayishni ko' rsatadi. Bu holat TiO₂ fotoaktiv qismida hosil bo' lgan issiqlik energiyasining termoelektrik qism tomon yo' nalgan transportini ifodalaydi. Haroratning yuqori va pastki chegaralar orasida barqaror kamayishi Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ termoelektrik strukturasi Seebeck effekti yuzaga kelishi uchun zarur bo' lgan termik sharoit mavjudligini ko' rsatadi [14, 15].

Hisoblangan 23.1 K harorat farqi gibrid strukturaning termoelektrik qismida sezilarli termik nomuvozanat hosil qilish imkonini beradi. Shu sababli fotoelektrik qatlamning qizishi mazkur tizimda faqat termik yo' qotish sifatida emas, balki ikkilamchi energiya manbai sifatida ham qaralishi mumkin [16].

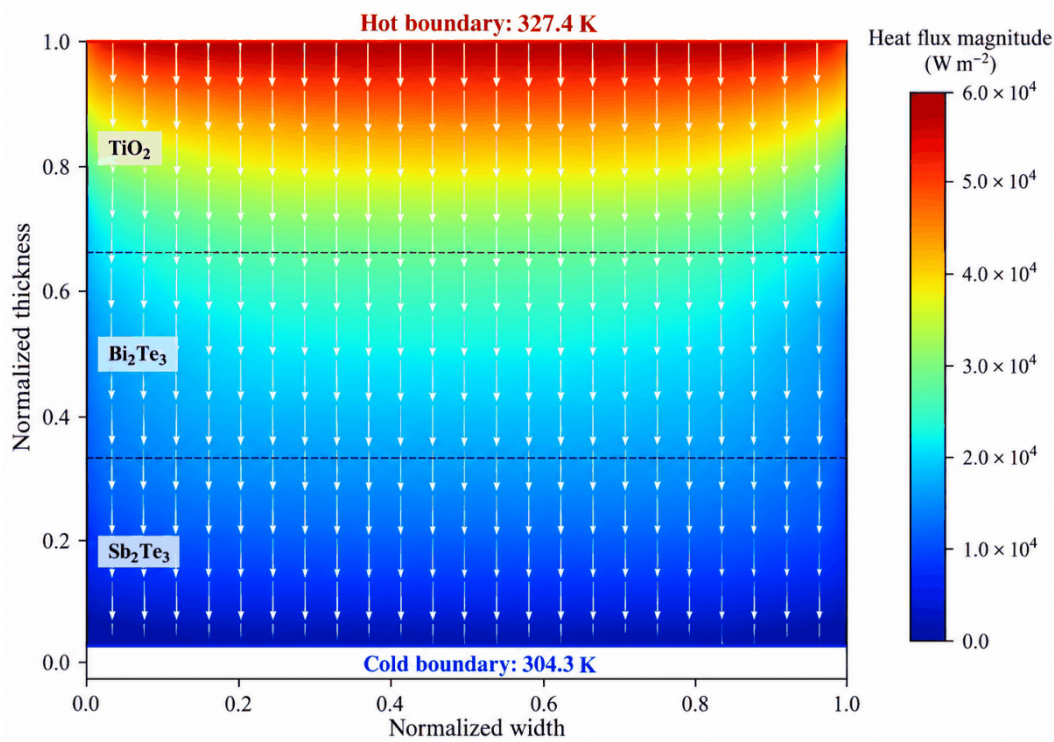
3.2. Quyosh nurlanishining fotoelektrik javobga ta'siri

Quyosh nurlanish intensivligi 200 dan 1000 W/m² gacha o' zgartirilganda TiO₂ qatlamining fotoelektrik javobida izchil o' sish kuzatildi. Nurlanish intensivligining ortishi fotoaktiv qatlamda generatsiyalanadigan zaryad tashuvchilar miqdorini ko' paytiradi va elektr transportini kuchaytiradi [14, 17, 19].

1000 W/m² nurlanish intensivligida TiO₂ fotoelektrik qismi uchun hisoblangan quvvat zichligi 0.412 mW/cm² ni tashkil etdi. Ushbu qiymat ko' rib chiqilayotgan gibrid strukturaning fotoelektrik kanalidagi asosiy elektr chiqishni tavsiflaydi [19].

Nurlanish intensivligi ortishi bilan fotoelektrik energiya generatsiyasi bilan bir qatorda TiO₂ qatlamining termik qizishi ham kuchayadi. Elektr energiyasiga aylantirilmagan optik energiyaning ma' lum qismi issiqlik shaklida ajralishi

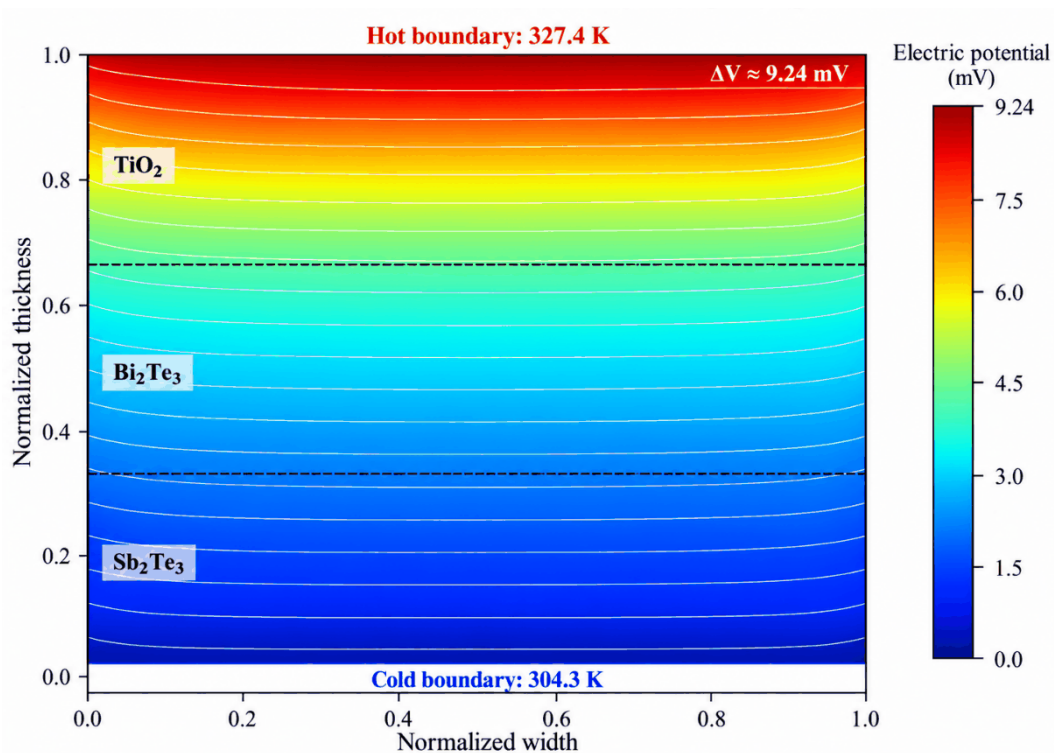
natijasida termoelektrik modul uchun zarur bo'lgan harorat gradienti shakllanadi. Demak, quyosh nurlanishining ortishi tizimning fotoelektrik va termoelektrik qismlariga bir vaqtda ta'sir ko'rsatadi [18-20].



2-rasm. Gibrid struktura bo'ylab issiqlik oqimi vektorlarining taqsimoti.

3.3. $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ strukturasi termoelektrik javobi

327.4 K va 304.3 K chegaraviy haroratlar orasida shakllangan 23.1 K farq $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ yarimo'tkazgichlarida termoelektrik potensialning paydo bo'lishiga olib keladi. p-turdagi Sb_2Te_3 va n-turdagi Bi_2Te_3 materiallarining Seebeck koeffitsiyentlari qarama-qarshi ishoraga ega bo'lganligi sababli, ularning elektr potensiallari mos ulanishda o'zaro qo'shilib, umumiy termoelektrik chiqishni oshiradi [14-16, 20].



3-rasm. Struktura bo'ylab elektr potensialning fazoviy taqsimoti.

Harorat gradientining mavjudligi Bi_2Te_3 va Sb_2Te_3 dagi asosiy zaryad tashuvchilarning issiq va sovuq zonalar orasida qayta taqsimlanishiga sabab bo'ladi. Natijada termoelektrik qismda mustaqil elektr potensial shakllanadi. Harorat

farqining 23.1 K gacha yetishi termoelektrik konversiyani amalga oshirish uchun yetarli termik haydovchi kuch mavjudligini ko'rsatadi.

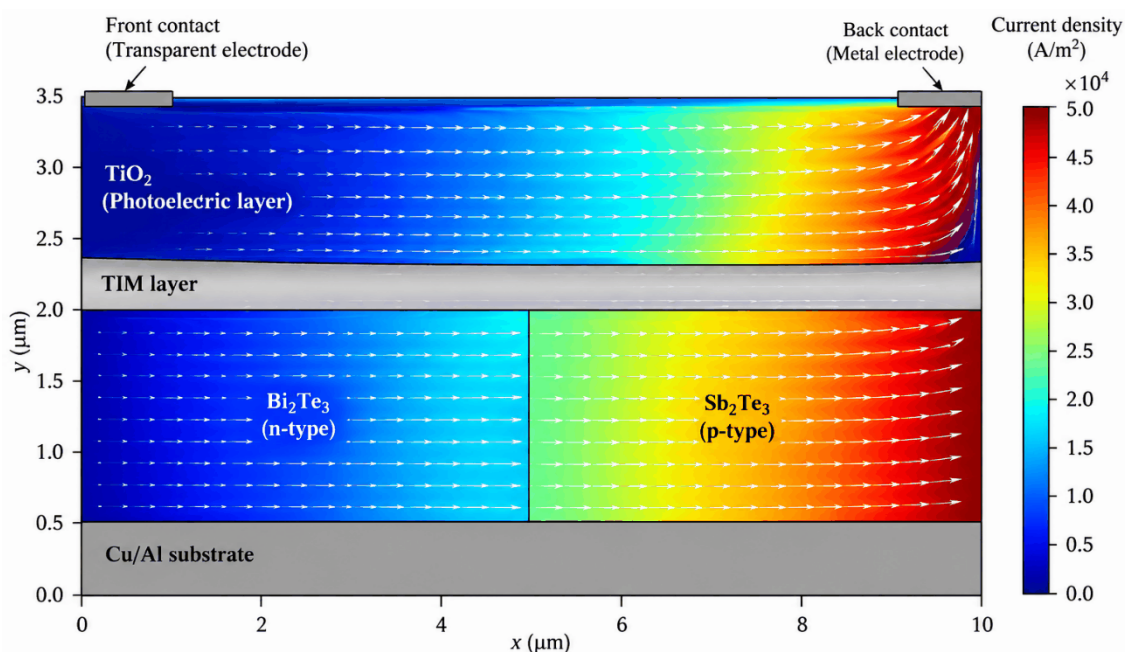
Bu natija TiO_2 qatlamida hosil bo'ladigan ortiqcha issiqlikdan $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ yordamida qo'shimcha elektr energiyasi olish imkoniyatini tasdiqlaydi.

3.4. Nurlanish intensivligi va issiqlik-elektr transportining o'zaro bog'liqligi

200–1000 W/m^2 diapazondagi parametrik hisoblashlar nurlanish intensivligi oshishi bilan tizimdagi issiqlik va elektr transport jarayonlarining o'zaro bog'liqligi kuchayishini ko'rsatdi.

Past nurlanish intensivligida TiO_2 qatlamining qizishi nisbatan kichik bo'lib, tizimning elektr chiqishida fotoelektrik komponent ustunlik qiladi. Nurlanish intensivligi oshishi bilan fotoaktiv qatlamda issiqlik generatsiyasi kuchayadi va termoelektrik qism uchun harorat gradienti ortadi.

400 W/m^2 dan past ish rejimlarida termoelektrik komponentning umumiy energiya konversiyasiga hisssasi nisbatan kichik bo'lishi kuzatildi. 700 W/m^2 dan yuqori nurlanish sharoitida esa termoelektrik qismning energetik roli sezilarli ortadi. Bu holat yuqori quyosh nurlanishi mavjud sharoitlarda gibridd foto-termoelektrik strukturalardan foydalanish maqsadga muvofiqligini ko'rsatadi.

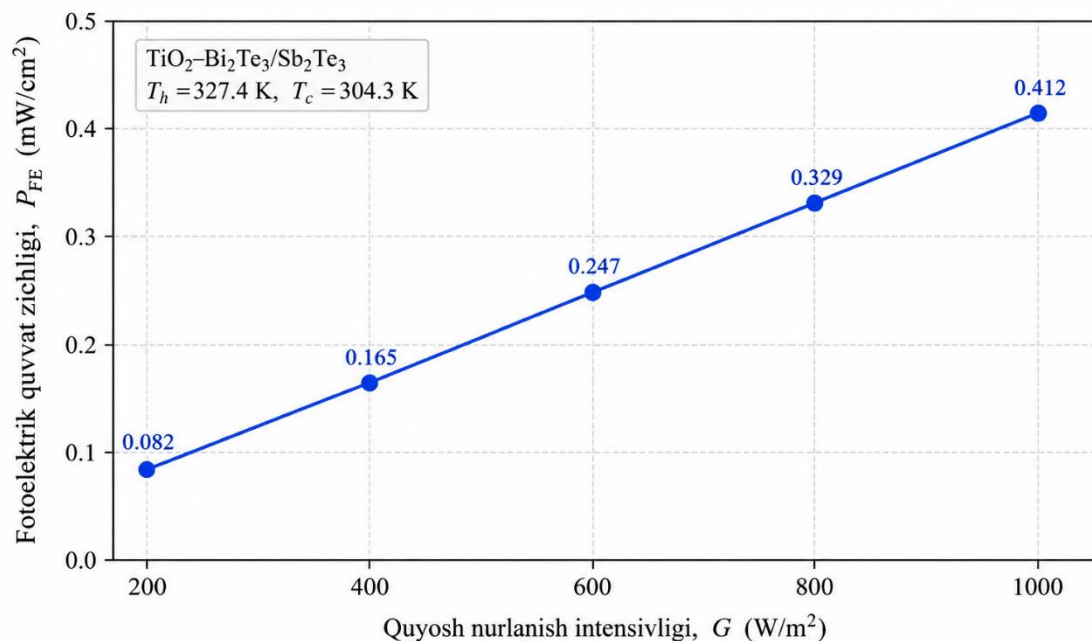


4-rasm. $\text{TiO}_2\text{--Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ strukturasida tok zichligining taqsimoti.

Mazkur chegaralar universal material konstantalari emas, balki tadqiqotda qabul qilingan struktura, material parametrlari va chegaraviy shartlarga tegishli ish rejimlari sifatida qaralishi kerak.

3.5. 2D harorat maydonining fizik tahlili

2D harorat taqsimoti natijalari strukturada yuqori haroratli TiO_2 tomoni bilan sovuq termoelektrik chegara o'rtasida uzluksiz issiqlik transporti mavjudligini ko'rsatdi. Yuqori chegaradagi 327.4 K qiymatdan pastki chegaradagi 304.3 K qiymatgacha haroratning kamayib borishi issiqlik oqimining aniq yo'nalishini shakllantiradi.



5-rasm. Quyosh nurlanish intensivligiga bog' liq holda fotoelektrik chiqish quvvatining o' zgarishi.

Harorat konturlarining taqsimlanishi strukturada termik muvozanat hali o' rnatilmaganligini, ya'ni termoelektrik energiya konversiyasi uchun zarur bo' lgan harorat gradienti saqlanib turganini ko' rsatadi. Aynan shu gradient $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ qismidagi zaryad tashuvchilar transportining termik tashkil etuvchisini yuzaga keltiradi.

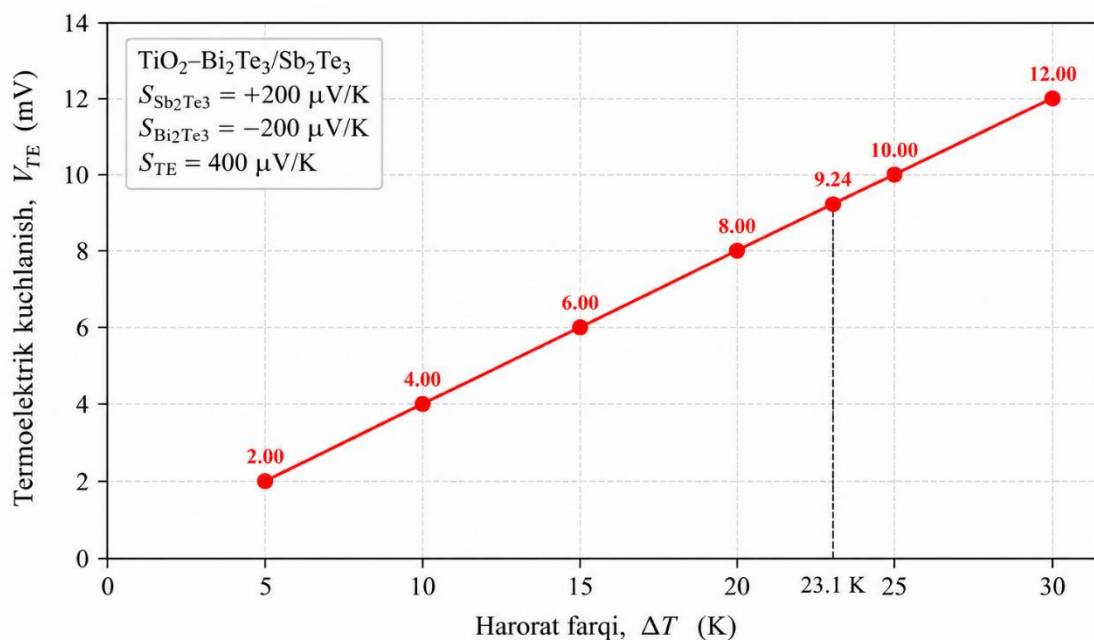
Natijalar shuni ko' rsatadiki, gibrid strukturada yuqori fotoelektrik samaradorlikka erishish bilan bir qatorda TiO_2 qatlamida hosil bo' lgan issiqlikni samarali ravishda termoelektrik elementga yetkazish ham muhim hisoblanadi. Agar issiqlik qatlamlararo chegaralarda kuchli yo' qotilsa, termoelektrik qismda hosil bo' ladigan foydali harorat gradienti kamayadi. Shu sababli materiallarning issiqlik o' tkazuvchanligi, qatlam qalinligi va kontakt sifatini optimallashtirish gibrid tizimning umumiy energetik xususiyatlarini yaxshilashning asosiy yo' nalishlaridan biridir.

3.6. Fotoelektrik va termoelektrik transportning umumiy mexanizmi

Olingan natijalar TiO_2 fotoelektrik va $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ termoelektrik qismlarini o' zaro bog' langan yagona energetik tizim sifatida qarash kerakligini ko' rsatdi. TiO_2 qatlamida quyosh nurlanishining yutilishi natijasida bir vaqtning o' zida zaryad tashuvchilar generatsiyasi va termik energiya hosil bo' ladi [15, 20].

Fotogeneratsiyalangan zaryad tashuvchilar fotoelektrik chiqishni shakllantiradi, issiqlikka aylangan energiya esa $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ qismida termoelektrik konversiya uchun ishlatiladi. Shunday qilib, birlamchi quyosh energiyasining fotoelektrik kanalda foydalanilmagan qismi termoelektrik kanal orqali qisman qayta o' zlashtirilishi mumkin [19-20].

327.4–304.3 K oralig' ida shakllangan 23.1 K harorat farqi va 1000 W/m^2 nurlanish intensivligida olingan 0.412 mW/cm^2 fotoelektrik quvvat zichligi ko' rib chiqilayotgan strukturaning bog' langan issiqlik-elektr transport mexanizmini tavsiflovchi asosiy natijalar hisoblanadi.



6-rasm. Harorat farqiga bog' liq holda termoelektrik kuchlanishning o' zgarishi.

Umuman, natijalar $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ strukturasienergetik xususiyatlari faqat alohida materiallarning fotoelektrik yoki termoelektrik parametrlariga emas, balki zaryad tashuvchilar transporti, harorat gradienti va qatlamlararo issiqlik uzatilishining o' zaro muvofiqligiga bog' liqligini ko' rsatdi.

4. XULOSA

Ushbu maqolada TiO_2 pardasimon fotoelektrik va $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ termoelektrik yarimo' tkazgich strukturalarida issiqlik va elektr transport jarayonlari o' zaro bog' langan holda tahlil qilindi. COMSOL Multiphysics muhitida issiqlik uzatilishi, elektr toki va termoelektrik effektlarni birlashtiruvchi model asosida strukturaning harorat maydoni, issiqlik oqimi, elektr potensial va tok zichligi xususiyatlari baholandi. Hisoblashlarda issiq va sovuq chegaralar mos ravishda 327.4 K va 304.3 K qilib belgilandi va natijada 23.1 K harorat farqi hosil qilindi.

Sonli natijalar TiO_2 fotoelektrik qatlami orqali yutilgan quyosh energiyasi bir vaqtning o' zida elektr va issiqlik transport jarayonlarini shakllantirishini ko' rsatdi. Quyosh nurlanish intensivligi 200–1000 W/m^2 oralig' ida ortishi bilan fotoelektrik chiqish quvvati muntazam oshib, 1000 W/m^2 sharoitida 0.412 mW/cm^2 ga yetdi. Shu bilan birga, fotoelektrik konversiyada foydalanilmagan energiyaning issiqlikka aylanishi $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ termoelektrik qismida Seebeck potensialining hosil bo' lishiga imkon berdi. 23.1 K harorat farqida qabul qilingan umumiy Seebeck koeffitsiyenti 400 $\mu\text{V/K}$ bo' lganda termoelektrik kuchlanish taxminan 9.24 mV ni tashkil etdi.

2D harorat, issiqlik oqimi, elektr potensial va tok zichligi taqsimotlari energiya transportining strukturada yo' naltirilgan xarakterga ega ekanligini ko' rsatdi. Nurlanish intensivligining ortishi nafaqat TiO_2 qatlamidagi fotogeneratsiyani kuchaytiradi, balki termoelektrik qism uchun zarur bo' lgan termik gradientni ham shakllantiradi. Natijalar 400 W/m^2 dan past rejimlarda termoelektrik komponentning hissasi nisbatan kichik, 700 W/m^2 dan yuqori sharoitlarda esa uning umumiy energetik chiqishga qo' shadigan hissasi sezilarli ortishini ko' rsatdi.

Shunday qilib, TiO_2 va $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ materiallarini yagona gibrid struktura doirasida birlashtirish fotoelektrik qatlamda hosil bo' ladigan ortiqcha issiqlikdan qo' shimcha elektr energiyasi olish imkonini beradi. Gibrid strukturaning samaradorligini oshirishda harorat gradientini barqaror saqlash, qatlamlararo issiqlik uzatilishini yaxshilash, elektr va issiqlik kontakt qarshiliklarini kamaytirish hamda $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ elementlarining termoelektrik parametrlarini optimallashtirish asosiy omillar hisoblanadi. Olingan natijalar $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ asosidagi foto-termoelektrik energiya o' zgartirgichlarning konstruktiv va energetik parametrlarini takomillashtirish uchun ilmiy asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1]. Snyder, G. J., Toberer, E. S. Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 2008, 7, 105–114. DOI: 10.1038/nmat2090.
- [2]. Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T., O' Quinn, B. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. Nature, 2001, 413, 597–602. DOI: [10.1038/35098012](https://doi.org/10.1038/35098012).
- [3]. Chen, M., Mao, Z., Ji, Y., Zong, P., Zhang, Q. Bi_2Te_3 -based flexible thermoelectrics. Materials Today Energy, 2024, 44, 101643. DOI: 10.1016/j.mtener.2024.101643.

4. [4]. Dong, G., Feng, J., Qiu, G., et al. Oriented Bi₂Te₃-based films enabled high performance planar thermoelectric cooling device for hot spot elimination. *Nature Communications*, 2024, 15, 9695. DOI: [10.1038/s41467-024-54017-3](https://doi.org/10.1038/s41467-024-54017-3).
5. [5]. Zheng, J., Ma, M., Yang, G., Wu, Y., Mei, D. Progress in the study of binary chalcogenide-based thermoelectric compounds. *Journal of Solid State Chemistry*, 2024, 334, 124617. DOI: [10.1016/j.jssc.2024.124617](https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124617).
6. [6]. Adam, A. M., Ibrahim, E. M. M., Mohammed, N. I., et al. Structural and thermoelectric properties of doped Bi₂Te₃ crystalline alloys. *Materials Science and Engineering B*, 2024, 303, 117276. DOI: [10.1016/j.mseb.2024.117276](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117276).
7. [7]. Wu, W., Ren, G., Chen, X., et al. Interfacial advances yielding high efficiencies for thermoelectric devices. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9, 3209–3230. DOI: [10.1039/D0TA06471H](https://doi.org/10.1039/D0TA06471H).
8. [8]. Liu, W., Bai, S. Thermoelectric interface materials: A perspective to the challenge of thermoelectric power generation module. *Journal of Materiomics*, 2019, 5(3), 321–336. DOI: [10.1016/j.jmat.2019.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.04.004).
9. [9]. Basu, R. Thermoelectric Modules: Key Issues in Architectural Design and Contact Optimization. *ChemNanoMat*, 2023, 9, e202200551. DOI: [10.1002/cnma.202200551](https://doi.org/10.1002/cnma.202200551).
10. [10]. Feng, T., Yam, F. K. Photoelectrochemical properties of anatase TiO₂ nanostructures prepared by hydrothermal method: Effect of illumination and external bias on charge transport. *Ceramics International*, 2024, 50, 19886–19897. DOI: [10.1016/j.ceramint.2024.03.116](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.03.116).
11. [11]. Brundha, C., Cha, J. K., Ren, Q. F., et al. Tuning the Pore Structures in TiO₂ Thin Films by Polymer Templates for High-Performance Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Energy Materials*, 2023, 6, 11081–11089. DOI: [10.1021/acsaem.3c01921](https://doi.org/10.1021/acsaem.3c01921).
12. [12]. Jiang, Z., He, Z., Ma, S., et al. Effect of Yttrium-Incorporated TiO₂ Electron Transport Layer on the Photovoltaic Performance of Triple-Cation Perovskite Solar Cells. *Journal of Physical Chemistry C*, 2023, 127, 19432–19439. DOI: [10.1021/acs.jpcc.3c05329](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c05329).
13. [13]. Green, A. N. M., Palomares, E., Haque, S. A., Kroon, J. M., Durrant, J. R. Charge Transport versus Recombination in Dye-Sensitized Solar Cells Employing Nanocrystalline TiO₂ and SnO₂ Films. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109, 12525–12533. DOI: [10.1021/jp050145y](https://doi.org/10.1021/jp050145y).
14. [14]. Park, Y., Cho, K., Yang, S., Park, T., Park, S., Song, H.-E., Kim, S. M., Kim, S. Performance of Hybrid Energy Devices Consisting of Photovoltaic Cells and Thermoelectric Generators. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12, 8124–8129. DOI: [10.1021/acsami.9b18652](https://doi.org/10.1021/acsami.9b18652).
15. [15]. Zhang, J., Zhai, H., Wu, Z., Wang, Y., Xie, H. Experimental investigation of novel integrated photovoltaic-thermoelectric hybrid devices with enhanced performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 215, 110666. DOI: [10.1016/j.solmat.2020.110666](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110666).
16. [16]. Lorenzi, B., Mariani, P., Reale, A., Di Carlo, A., Chen, G., Narducci, D. Practical development of efficient thermoelectric–photovoltaic hybrid systems based on wide-gap solar cells. *Applied Energy*, 2021, 300, 117343. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.117343](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117343).
17. [17]. Tang, J., Ni, H., Peng, R.-L., Wang, N., Zuo, L. A review on energy conversion using hybrid photovoltaic and thermoelectric systems. *Journal of Power Sources*, 2023, 562, 232785. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2023.232785](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232785).
18. [18]. Huq, M., Jasi, A. M., Poure, P., Jovanovic, S., Revol, I., Lenoir, B. Critical analysis of optimized energy harvesting at small-scale by thermally coupled photovoltaic-thermoelectric systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 195, 114331. DOI: [10.1016/j.rser.2024.114331](https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114331).
19. [19]. Moshwan, R., Shi, X.-L., Zhang, M., Yue, Y., Liu, W.-D., Li, M., Wang, L., Liang, D., Chen, Z.-G. Advances and challenges in hybrid photovoltaic-thermoelectric systems for renewable energy. *Applied Energy*, 2025, 380, 125032. DOI: [10.1016/j.apenergy.2024.125032](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125032).
20. [20]. Wang, N., Han, L., He, H., Park, N.-H., Koumoto, K. A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4, 3676–3679. DOI: [10.1039/C1EE01646F](https://doi.org/10.1039/C1EE01646F).