FE–TE INTEGRATSIYASI UCHUN KONTAKT MATERIALINI TAHLIL QILISH VA TANLASH

Kasimaxunova Anarxan Mamasadikovna
Farg‘ona davlat texnika universiteti “Elektroenergetika” kafedrasi professori, d.t.n.
Atajonov Muxiddin Odiljonovich
Andijon davlat texnika instituti, “Muqobil energiya manbalari” kafedrasi dotsenti

Annotatsiya: Ushbu maqolada fotoelektr (FE) va termoelektr (TE) o‘zgartkich texnologiyalarini birlashtiruvchi gibrid tizimlar uchun optimal kontakt materiallarini tanlashga bag‘ishlangan. FE elementlar quyosh nurlarining elektr energiyaga aylantirsa, TE modullar qizigan FE sirtidan chiqayotgan issiqlik oqimini qo‘shimcha elektr manbai sifatida qayta ishlaydi. Biroq FE va TE qatlamlarning bevosita ulanishi issiqlik-kimyo diffuziyasi, kontakt qarshiligini ortishi, issiqlik oqimi cheklanishi va mexanik bosim kabi muammolarni keltirib chiqaradi. Shu bois, kontakt materiallarini to‘g‘ri tanlash gibrid FE–TE tizimining barqarorligi va umumiy samaradorligini belgilovchi asosiy omildir. Tadqiqotda FE qatlamlar uchun omik kontaktlarni optimallashtirish, TE materiallar bilan o‘zaro ta’sirni kamaytirish, diffuziya barerlarini hosil qilish va interfeys issiqlik qarshiligini minimallashtirish tamoyillari asosida tahlil olib borildi. Nano-interfeys qatlamlari (h-BN, AlN, SiO_2) ning elektr izolyatsiyasi, yuqori issiqlik o‘tkazuvchanligi va kimyoviy inertligi FE–TE integratsiyasi uchun eng samarali yechim ekanligi aniqlangan. Tanlangan kontakt materiallari hisobiga FE elementlarning issiqlikdan kelib chiqadigan samaradorlik yo‘qotishlari kamayadi, TE modulning chiqish quvvati ortadi va umumiy gibrid tizim samaradorligi oshadi.

Kalit so‘zlar: FE–TE integratsiyasi, kontakt materiallari, CdTe/CdS fotoelementi, Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr materiali, issiqlik qarshiligi, nano-interfeys (h-BN, AlN, SiO_2), diffuziya bareri, ohmik kontakt, monolit gibrid tizim.

Аннотация. В данной статье рассматривается выбор оптимальных контактных материалов для гибридных систем, объединяющих фотоэлектрические (ФЭ) и термоэлектрические (ТЭ) преобразовательные технологии. ФЭ-элементы преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию, тогда как ТЭ-модули используют тепловой поток, исходящий от нагретой поверхности ФЭ-слоя, как дополнительный источник энергии. Прямая интеграция ФЭ и ТЭ структур сопровождается рядом проблем, включая термохимическую диффузию, увеличение контактного сопротивления, ограничение теплового потока и механическое напряжение. Поэтому корректный выбор контактных материалов является ключевым фактором, определяющим стабильность и общую эффективность гибридной

ISSN 3030-3907

ФЭ–ТЭ системы. В исследовании проведён анализ принципов оптимизации омических контактов для ФЭ-структур, снижения взаимного влияния с ТЭ-материалами, формирования диффузионных барьеров и минимизации межфазного теплового сопротивления. Установлено, что наноинтерфейсные слои (h-BN, AlN, SiO_2), обладающие высокой теплопроводностью, химической инертностью и способностью к электрической изоляции, являются наиболее перспективным решением для интеграции ФЭ–ТЭ модулей. Выбор соответствующих контактных материалов снижает тепловые потери ФЭ-элементов, повышает выходную мощность ТЭ-модуля и увеличивает суммарную эффективность гибридной системы.

Ключевые слова: интеграция ФЭ–ТЭ, контактные материалы, фотоэлемент CdTe/CdS, термоэлектрический материал Bi_2Te_3/Sb_2Te_3, тепловое сопротивление, наноинтерфейс (h-BN, AlN, SiO_2), диффузионный барьер, омический контакт, монолитная гибридная система.

Annotation. This article focuses on selecting optimal contact materials for hybrid systems that combine photoelectric (PE) and thermoelectric (TE) conversion technologies. PE elements convert solar radiation into electrical energy, whereas TE modules reuse the thermal flux emitted from the heated PE surface as an additional power source. However, direct PE–TE integration introduces challenges such as thermochemical diffusion, increased contact resistance, restricted heat flow, and mechanical stress. Therefore, the proper selection of contact materials is a key factor determining the stability and overall efficiency of hybrid PE–TE systems. The study analyzes approaches to optimizing ohmic contacts for PE layers, reducing interactions with TE materials, forming diffusion barriers, and minimizing interfacial thermal resistance. Nano-interface layers (h-BN, AlN, SiO_2), known for their electrical insulation properties, high thermal conductivity, and chemical inertness, were identified as the most effective solution for PE–TE integration. By employing the selected contact materials, thermal efficiency losses in PE elements decrease, the output power of the TE module increases, and the total performance of the hybrid system is enhanced.

Keywords: PE–TE integration, contact materials, CdTe/CdS solar cell, Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 thermoelectric material, thermal resistance, nano-interface (h-BN, AlN, SiO_2), diffusion barrier, ohmic contact, monolithic hybrid system.

1. KIRISH

Global miqyosda qayta tiklanuvchi energiya texnologiyalarining rivojlanishi energiya o‘zgartirgichini ko‘p kanalli, yuqori samarali tizimlar orqali amalga oshirish zarurligini kuchaytirmoqda. Quyosh fotoelementlari (FE) hozirgi energiya bozorining asosiy texnologiyalaridan biri bo‘lsa-da, ularning foydali ish

ISSN 3030-3907

koeffitsienti fundamental chegaralangan bo‘lib, tushayotgan quyosh energiyasining faqat spektral qismi elektr tokiga aylanadi, qolgan qismi esa issiqlik ko‘rinishida yo‘qoladi. Masalan, CdTe asosidagi yupqa qatlamli fotoelementlar ish paytida 40–80°C gacha qizishi mumkin va har 1°C ortish samaradorlikning ~0,12% kamayishiga olib keladi. Bu issiqlikni samarali qayta foydalanishga jalb etish uchun termoelektr (TE) modullar bilan integratsiya qilish istiqbolli yechim bo‘lib, FE-TE (photovoltaic–thermoelectric) tizimlari quyosh nuri + issiqlik oqimini bir vaqtda elektr energiyasiga aylantirish imkonini beradi [1].

CdTe/CdS fotoelektr qatlamlari yuqori yutilish koeffitsienti, 1,45 eV atrofidagi to‘g‘ri soha bo‘shlig‘i va past ishlab chiqarish tannarxi bilan ajralib turadi. Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 asosidagi termoelektr materiallar esa xona haroratiga yaqin ish sharoitlarida ZT ≈ 1,2 qiymatini ta’minlaydi va ulardan chiqayotgan issiqlikni qo‘shimcha elektr manbai sifatida qayta tiklash imkonini beradi. Biroq ushbu ikki texnologiyani monolit tarzda birlashtirish murakkab interfeys muammolarini yuzaga keltiradi [2]. Bular issiqlik-kimyo diffuziyasi, kontakt potensiallari, mexanik bosim, kristall panjara nomutanosibligi va elektr izolyatsiyasini ta’minlash zaruratidan iborat.

Eng asosiy muammolardan biri — **materiallar orasida to‘g‘ridan-to‘g‘ri kontakt hosil qilish natijasida tellur atomlarining ikki tizim o‘rtasida diffuziyalanishi**, bu esa rekombinatsiya markazlari paydo bo‘lishiga, kristall struktura buzilishiga va umumiy samaradorlikning pasayishiga olib keladi. Shuningdek, CdTe (5.9×10^{-6} K^{-1}) va Bi_2Te_3 (13.4×10^{-6} K^{-1}) materiallarining issiqlik kengayish koeffitsientlari keskin farq qiladi, bu esa siklik qizish-sovish jarayonida qatlamlarning yorilishi yoki delaminatsiyasiga sabab bo‘lishi mumkin [3, 5].

Shuning uchun **kontakt materiallarini to‘g‘ri tanlash** FE–TE integratsiyasining asosiy talabi hisoblanadi. CdTe uchun orqa kontakt sifatida Cu/Au, Ni, Mo yoki grafit kompozitlar elektr to‘siq balandligini pasaytirish bilan birga, barqaror issiqlik taqsimotini ta’minlaydi. Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 uchun esa Ni, Pt va Ti/Au kontaktlar past kontakt qarshiligi, yuqori haroratga chidamlilik va kimyoviy inertlik sababli ma’qul hisoblanadi. Bularni to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulash o‘rniga, **nano-interfeys qatlamlari** (AlN, h-BN, SiO_2) qo‘llanilishi elektr izolyatsiya, issiqlik o‘tkazuvchanlik, diffuziya bareri va bosim kompensatsiyasini ta’minlab, R_{th} ni 10^{-7} m^2K/W gacha pasaytirishga sabab bo‘ladi [4,10].

Shu nuqtai nazardan, kontakt materiallarini tanlash nafaqat elektr ulanishni ta’minlash, balki issiqlik oqimini boshqarish, materiallararo kimyoviy moslik, mexanik mustahkamlik va nano-miqyosdagi interfeys muhandisligi muammolarini ham qamrab oladi. Tadqiqotning dolzarbligi shundaki, FE–TE gibrid tizimlar

ISSN 3030-3907

samaradorligini oshirish ko‘p jihatdan aynan kontakt materiallari fizikasi va interfeys dizayniga bog‘liq.

2. TADQIQOTNING MAQSADI

CdTe/CdS asosidagi fotoelektr elementlar va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modullarini monolit gibrid FE–TE tizimga integratsiya qilishda kontakt materiallarini ilmiy asosda tanlash, interfeys muhandisligini ishlab chiqish va issiqlik-elektr transport xususiyatlarini optimallashtirishdan iborat.

2.1. Tadqiqotning vazifalari

- FE va TE materiallarining fizik, termoelektrik va sirt-kimyoviy xossalarini tahlil qilish, ularning integratsiya uchun moslik darajasini aniqlash.
- CdTe fotovoltaik qatlami uchun optimal orqa kontakt materiallarini (Cu/Au, Ni, Mo, grafit va boshqalar) *barer balandligi, omik aloqadorlik, haroratga chidamlilik* mezonlari asosida baholash.
- Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr qatlamlar uchun mos metall kontaktlarni *Seebeck koeffitsienti, elektr qarshilik, diffuziya xavfi* bo‘yicha tanlash.
- Nano-interfeys qatlamlari (h-BN, AlN, SiO_2) ning issiqlik o‘tkazuvchanligi, elektr izolyatsiyasi, kimyoviy barqarorligi bo‘yicha solishtirma tahlilini o‘tkazish.
- Interfeys issiqlik qarshiligi R_{th} ni nazariy modellashtirish va optimallashtirish, minimal qiymatga erishish shartlarini aniqlash.

Gibrid fotoelektrik–termoelektrik (FE-TE) tizimlari bo‘yicha adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, FE va TE elementlarning integratsiyasi faqat energiya o‘zgartirgichni oshirishga emas, balki issiqlik boshqaruvini optimallashtirishga ham xizmat qiladi. CdTe/CdS asosidagi fotoelementlar yuqori yutilish koeffitsienti va sanoatga mos ishlab chiqarish texnologiyalari tufayli eng istiqbolli yupqa qatlamli PV texnologiyalardan biri hisoblanadi [1]. So‘nggi yillarda CdTe samaradorligi 22% atrofida qayd etilgani, uning raqobatbardoshligini yanada oshirgan. Biroq bu texnologiyaning asosiy kamchiligi — harorat oshishi bilan samaradorlikning pasayishi bo‘lib, bu FE–TE gibridlashning ilmiy asosini belgilaydi [2].

Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr materiallari xona haroratiga yaqin sharoitlarda yuqori ZT qiymati tufayli ishlatiladi [3]. Termoelektr samaradorlik ko‘p jihatdan interfasial issiqlik o‘tkazuvchanlikka bog‘liq bo‘lib, FE–TE interfeysining issiqlik qarshiligi TE o‘zgartirgichini keskin chegaralaydi. Issiqlik interfeyslari bo‘yicha zamonaviy tadqiqotlar issiqlik oqimini boshqarish uchun AlN, h-BN, SiO_2 kabi qatlamlardan foydalanish issiqlik o‘tkazuvchanlikni oshirishi va hajmini kamaytirishini ko‘rsatgan [7].

CdTe tizimida kontaktlar boshqa muammolarni yuzaga keltiradi. CdTe orqa kontaktlarida yuqori to‘siq balandligi va diffuziya natijasida rekombinatsiya

ISSN 3030-3907

markazlari shakllanishini oldini olish uchun passivlash va barier qatlamlari taklif etilgan [6]. Bu ayniqsa, TE elementlar bilan bevosita kontaktga kirganda muhim ahamiyatga ega, chunki har ikki material tarkibidagi tellur atomlari interdiffuziyaga moyildir [9].

Shu bilan birga, FE–TE gibrid tizimalar bo‘yicha keng qamrovli ko‘rib chiqish ishlari FE qizishdan kelayotgan issiqlikni TE modullarga uzatish orqali **umumiy ishlab chiqarish quvvatini oshirish mumkin** degan ilmiy asosni beradi [4]. Biroq mavjud tadqiqotlarning aksariyati modul darajasida issiqlik yig‘ish va TE qo‘shish orqali energiya hosil qilishni ko‘rib chiqadi, monolit integratsiya esa sust o‘rganilganligi ma’lumdir [5].

Amaldagi ishlanmalar ko‘proq issiqlik kollektorlar, qizdirilgan plastinalar yoki moslashgan radiatorlar qo‘shish orqali FE-TE samaradorligini oshirishga qaratilgan bo‘lib, nano-interfeys qatlamlari asosidagi monolit integratsiya mexanizmlari yetarlicha tadqiq qilinmagan. Xususan, h-BN va AlN qatlamlarining **elektr izolyatsiyasi va yuqori issiqlik o‘tkazuvchanlik** xususiyatlari hali CdTe–Bi_2Te_3 juftligida chuqur eksperimental va kombinatsion modellashtirish asosida baholanmagan va bu tadqiqot uchun muammolar ochiqligicha qolmoqda [11].

3. MATERIAL VA USLUBLAR

Mazkur tadqiqotda CdTe/CdS asosidagi fotoelektr qatlamlar va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modullarni monolit integratsiya qilishda kontakt materiallarini tanlash jarayoni ko‘p fazali fizik modellashtirish, sirt muhandisligi va interfeys tahliliga asoslangan metodologiya orqali amalga oshirildi. Tahlil uchta asosiy parametrga yo‘naltirildi. Bu parametrlar **elektr kontakt qarshiligi, issiqlik o‘tkazuvchanlik, diffuziya va barqarorlik etib olindi [8].**

3.1. Materiallarni tanlashning metodik yondashuvi

Avvalo, CdTe–metal kontaktlaridagi potentsial to‘siq balandligi Poisson tenglamalariga asoslangan holda baholandi. CdTe uchun ishchi kontakt sifatida Cu/Au, Ni, Mo, grafit kompozitlar ko‘rib chiqildi, chunki ular p-tur CdTe bilan past barer hosil qiladi va sirt holatini buzmaydi. Kontakt qarshiligi quyidagi keng qo‘llaniladigan tenglama orqali hisoblandi:

$$R_c = \frac{F_B}{q\mu_p p_0}$$

bu yerda F_B — to‘siq balandligi, μ_p— kovak harakatchanligi, p_0 — teshiklar konsentratsiyasi.

Kam qiymatli F_B FE chiqish kuchlanishini oshiradi, bu Cu yoki Au asosidagi kontaktlar uchun ayni muddaodir [6, 9].

Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr qatlami uchun kontaktlar (Ni, Pt, Ti/Au) Seebeck koeffitsientining kamaymasligi va termoelektr juftlar interfeysida qo‘shimcha fonon tarqalishini keltirib chiqarmasligi mezonlariga asoslanib tanlandi [3, 10].

ISSN 3030-3907

3.2. Nano-interfeys tanlovi va issiqlik transporti

FE va TE qatlamlarni bevosita ulash interdiffuziya xavfini keltirib chiqaradi, shuning uchun nano-interfeys qo‘llash zarur. Tadqiqotda h-BN asosiy namuna sifatida tanlandi, chunki uning **taqiqlangan soxa kengligi ~5,9 eV** kuchli dielektrik xususiyatga ega, **k ≈ 200–400 W/mK** issiqlikni yaxshi o‘tkazadi, **Van der Waals struktura** atomlar diffuziyasini to‘xtatadi.

Interfeys issiqlik qarshiligini hisoblash uchun Fourier qonuni asosidagi kontakt modeli ishlatildi:

$$R_{th} = \frac{t}{kA}$$

bu yerda t — qatlam qalinligi, k — issiqlik o‘tkazuvchanligi, A — kontakt maydoni. h-BN 5–20 nm diapazonda olinishi natijasida $R_{th} \approx 10^{-7} m^2 K/W$ ga erishish mumkinligi nazariy asoslandi [7].

3.3. Issiqlik kengayish koeffitsientlari mosligi

Materiallar issiqlik bosimini baholash uchun quyidagi ifodadan foydalanildi:

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

bu yerda α — issiqlik kengayish koeffitsienti. CdTe (5.9×10^{-6} K^{-1}) va Bi_2Te_3 (13.4×10^{-6} K^{-1}) o‘rtasidagi farq kuchli bosim hosil qiladi, h-BN esa (1.5×10^{-6} K^{-1}) kompensator rolini bajaradi.

Eng axamiyatlisi, interfeys qo‘llanilganda yorilish xavfi ~45–60% gacha kamayadi.

4. MUHOKAMA VA NATIJA

h-BN (hexagonal boron nitride) — bu bor nitridining geksagonal kristall tuzilishga ega modifikatsiyasi bo‘lib, grafitga juda o‘xshash qatlamli (2D) materialdir. Uni ba’zan “oq grafen” deb ham atashadi, chunki uning tuzilishi grafenga o‘xshaydi, lekin ularning farqi h-BN izolyator, grafen esa o‘tkazgich material sifatida ishlatiladi.

1-jadval.

Asosiy xususiyatlari

Xossalari	Ta’riflari
Kimyoviy formulasi	BN
Tuzilishi	geksagonal, 2D qatlamli
Elektr xossasi	dielektrik (taqiqlangan hudud ~ 5.9 eV)
Issiqlik o‘tkazuvchanligi	qatlam bo‘ylab 200–400 W/mK
Issiqlikdan kengayish koeffitsienti	juda past ($1–2\times10^{-6}$ K^{-1})
Erish harorati	~ 2973 K (juda yuqori)
Mekanik mustahkamlik	yuqori, qatlamli

ISSN 3030-3907

Haroratga chidamliligi	juda yuqori (2000°C gacha inert holatda)

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, yuqori issiqlik oqimiga ega bo‘lgan interfeys FE samaradorligining issiqlik sababli kamayishini to‘xtatadi, TE moduli esa qo‘shimcha quvvat ishlab chiqaradi. Yuqori issiqlik o‘tkazuvchi h-BN interfeysi qo‘llanishi issiqlik oqimini oshirib, FE–TE tizimning umumiy samaradorligini oshiradi [10, 11].

2-jadval.

Material tanlash bo‘yicha muhokamalar jadvali.

Kontaktlar	Afzalligi	Kamchiliklari
Cu/Au (CdTe orqa kontakt)	past F_B, yaxshi ohmik bog‘lanish	diffuziya xavfi
Ni (TE kontakt)	barqaror va issiqlikka chidamli	yuqori narx
h-BN interfeysi	issiqlik o‘tkazuvchan, elektr izolyator	nanofabrika talab qiladi

Shu bois kelajakda tadqiqotlar interfeys qalinligini optimallashtirish, kompozit interlayer ishlab chiqish (AlN + h-BN) va COMSOL orqali ko‘p-fizikali modellashga qaratilishi zarur deb hisoblayman.

XULOSA

Tadqiqot asosida aniqlanishicha, CdTe/CdS fotoelementlari va Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 termoelektr modullarni monolit tarzda birlashtirishda kontakt tanlashning uch muhim mezoni ko‘rilgan; **elektr qarshiligini minimallashtirish**, **interfeys issiqlik o‘tkazuvchanligini oshirish** va **kimyoviy diffuziyani cheklash shular jumlasidandir**. Nano-interfeys qatlamlari (h-BN, AlN, SiO_2) ushbu mezonlarni bir vaqtning o‘zida ta’minlay olishi, issiqlik oqimini yaxshilashi, elektr izolyatsiyasi va yuqori kimyoviy barqarorligi bilan FE–TE tizimi uchun eng maqbul yechim ekanligi tasdiqlandi.

Umuman olganda, ushbu tadqiqot FE–TE gibrid tizimlari uchun kontakt materiallari tanlashda kompleks yondashuv zarurligini ko‘rsatadi. Elektr, issiqlik va mexanik parametrlarning uyg‘un optimallashtirilishi kelajakda yuqori samarali, barqaror va texnologik jihatdan integratsiyalanadigan gibrid energiya o‘zgartkich qurilmalarini hosil qilish uchun muhim ilmiy asos yaratadi. Tadqiqot natijalari ushbu yo‘nalishda keyingi eksperimental va kompyuter modellashtirish ishlanmalari uchun muhim nazariy poydevor bo‘lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Britt, J., & Ferekides, C. (1993). Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Applied Physics Letters, 62*(22), 2851–2852.

ISSN 3030-3907

2. Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30*(1), 3–12.
3. Harman, T.C., Walsh, M.P., LaForge, B.E., & Moore, G.P. (2005). Nanostructured thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials, 34*(9), 1612–1619.
4. Hu, R. (2020). Hybrid photovoltaic–thermoelectric systems: A review. *Energy Conversion and Management, 205*, 112330.
5. Koumoto, K., & Mori, T. (2013). *Thermoelectric nanomaterials*. Springer.
6. Li, X., Sun, S., & Zhou, H. (2018). Interface passivation strategies for CdTe thin-film photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells, 185*, 420–429.
7. Pan, Y., Li, H., & Chen, X. (2019). Thermal interface engineering for high-performance thermoelectric devices. *Advanced Functional Materials, 29*(14), 1900209.
8. Rowe, D. M. (2006). *Thermoelectrics handbook: Macro to nano*. CRC Press.
9. Zhang, S. B., Wei, S. H., & Zunger, A. (2000). Defects in semiconductors and their role in material performance. *Physical Review Letters, 84*(6), 1232–1235.
10. M. O. Atazhonov, Qudratbek Mamarasulov, L. M. Gimaeva, and R. I. Suleimanov "Mathematical model of a photoelectric thermal electric energy converter under load", Proc. SPIE 13662, Fourth International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2025), 136620O (5 June 2025); https://doi.org/10.1117/12.3072651.
11. Atajonov, M.: Development of technology for the development of highly efficient combinations of solar and thermoelectric generators. AIP Conf. Proc. 3045, 020011 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0197733.

ISSN 3030-3907