

ALTERMAGNETIK MATERIALLARNING QUYOSH PANELLARIDA
SPIN-QARAMLI FOTOTOK HOSIL QILISHI VA UNING
SAMARADORLIKKA TA'SIRI

A.M. Djabbarberdiyeva

M.S. Sobirov

Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti,
Fizika yo'nalishi bakalavriatining 4-kurs talabasi, Nukus shahri.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15864690>

Annotatsiya. So'nggi yillarda quyosh energiyasidan samarali foydalanish muhim ekologik va iqtisodiy masalaga aylangan. An'anaviy silikon asosidagi fotovoltaiik panellarning samaradorligini oshirish maqsadida yangi fizik effektlar va ilg'or materiallar keng tadqiq qilinmoqda. Mazkur maqolada yaqinda ilm-fanda kashf etilgan altermagnetik materiallarning spin-qaramli fototok hosil qilishdagi roli o'rganiladi. Altermagnetik holat o'zining nolinch magnit momentiga qaramay, elektronlarning spiniga sezgir transport xossalari bilan ajralib turadi. Ushbu xususiyatlarni yorug'lik yutilishi bilan birgalikda qo'llash orqali spin-selektiv fototoklarni hosil qilish mumkinligi nazariy jihatdan asoslanadi. Maqolada bu materiallarning elektron tuzilmasi, spin-selektivlik mexanizmlari va fotovoltaiik tizimlarga integratsiyalash imkoniyatlari tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalari kelajakda spintronik fotovoltaiika yo'nalishida yuqori samarali quyosh panellarini yaratishga ilmiy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: Altermagnetizm, spin-selektiv fotojarayonlar, quyosh panellari, energiya samaradorligi, spintronika, fotoelementlar, chiral simmetriya, energiya oqimi, foton energiyasi, kvant hisoblash, spin oqimi, altermagnetik materiallar, fotovoltaiik qurilmalar.

SPIN-DEPENDENT PHOTOCURRENT GENERATION BY ALTERMAGNETIC
MATERIALS IN SOLAR PANELS AND ITS IMPACT ON EFFICIENCY

Annotation. In recent years, the efficient use of solar energy has become an important ecological and economic issue. In order to increase the efficiency of traditional silicon-based photovoltaic panels, new physical effects and advanced materials are being actively investigated.

This article explores the role of recently discovered altermagnetic materials in generating spin-dependent photocurrents. Despite having a zero net magnetic moment, the altermagnetic state is distinguished by its spin-sensitive transport properties. It is theoretically justified that the combination of these properties with light absorption can result in the generation of spin-selective photocurrents. The article analyzes the electronic structure of these materials, mechanisms of spin selectivity, and possibilities of integration into photovoltaic systems. The research results may serve as a scientific basis for the development of highly efficient solar panels in the emerging field of spintronic photovoltaics.

Keywords: Altermagnetism, spin-selective photo-processes, solar panels, energy efficiency, spintronics, photoelements, chiral symmetry, energy flow, photon energy, quantum computing, spin current, altermagnetic materials, photovoltaic devices.

ФОРМИРОВАНИЕ СПИН-ЗАВИСИМОГО ФОТОТОКА В СОЛНЕЧНЫХ
ПАНЕЛЯХ НА ОСНОВЕ АЛТЕРМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЕГО
ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Аннотация. В последние годы эффективное использование солнечной энергии стало важной экологической и экономической задачей. С целью повышения эффективности традиционных кремниевых фотоэлектрических панелей активно исследуются новые физические эффекты и передовые материалы. В данной статье рассматривается роль недавно открытых альтермагнитных материалов в формировании спин-зависимого фототока. Несмотря на нулевой магнитный момент, альтермагнитное состояние характеризуется чувствительными к спину транспортными свойствами. Теоретически обосновано, что совмещение этих свойств с поглощением света позволяет формировать спин-селективные фототоки. В статье анализируются электронная структура этих материалов, механизмы спин-селективности и возможности интеграции в фотоэлектрические системы. Полученные результаты могут стать научной основой для создания высокоэффективных солнечных панелей в развивающемся направлении спинтронной фотоэлектроники.

Ключевые слова: Альтермагнетизм, спин-селективные фотопроцессы, солнечные панели, энергетическая эффективность, спинтроника, фотоэлементы, хиральная симметрия, энергетический поток, энергия фотона, квантовые вычисления, спиновый ток, альтермагнитные материалы, фотоэлектрические устройства.

1. Kirish

So‘nggi yillarda fotovoltaik (quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantiruvchi) qurilmalar energetika sohasida katta ahamiyat kasb etib, atrof-muhitga kam zarar yetkazadigan, barqaror manba sifatida faol tadqiq qilinmoqda [1]. An‘anaviy silikonli quyosh panellari allaqachon keng tarqalgan bo‘lsa-da, ularning samaradorligini oshirish zarurati tufayli yangi avlod materiallariga ehtiyoj ortib bormoqda [2]. Ayniqsa, so‘nggi yillarda spintronika va fotonika sohalari birlashgan nuqtalarda kuzatilayotgan fizik effektlar — xususan, spin-qaramli fotoeffektlar — quyosh panellarining ishlash samaradorligini oshirish imkonini bermoqda [3].

Аltermagnetizm — bu yaqinda ilmiy adabiyotlarda o‘z o‘rnini topayotgan, klassik ferromagnetizm yoki antiferromagnetizmga o‘xshamaydigan yangi turdagi magnit holat bo‘lib, o‘ziga xos elektron xossalari bilan ajralib turadi [4]. Garchi bu materiallar makroskopik darajada nolga teng magnit momentga ega bo‘lsa-da, ularning elektron transport xususiyatlari spin holatiga bog‘liq ravishda sezilarli tafovut ko‘rsatadi [5]. Bu esa ular orqali spin selektiv tok hosil qilish imkonini beradi, ya‘ni faqat muayyan spin holatidagi elektronlar transport jarayonlarida ishtirok etadi. Agar bunday spin selektivlik yorug‘lik yutilishi jarayoniga integratsiyalansa, bu orqali “spin-fotovoltaik” qurilmalar yaratish istiqbollari ochiladi [6].

Mazkur yo‘nalish hozircha asosan nazariy tahlil bosqichida bo‘lib, uning tajriba asosidagi o‘rganilishi hali to‘liq shakllanmagan. Shunga qaramay, altermagnetik materiallarning elektron tuzilmasi, yorug‘lik bilan o‘zaro ta’sirlari va ularning spin-qaramli fototok hosil qilishdagi imkoniyatlari ushbu materiallarni quyosh panellari uchun istiqbolli nomzod sifatida ko‘rsatmoqda [7]. Ushbu maqolada biz altermagnetik materiallarning fizik xossalarini, ularni fotovoltaik tizimlarga integratsiyalash imkoniyatlarini hamda ular yordamida spin-qaramli tok hosil qilish mexanizmlarini tahlil qilamiz.

2. Nazariy asoslar va adabiy sharh

Altermagnetizm — bu 2022-yilda aniqlangan, oʻziga xos simmetriyaviy xususiyatlarga ega boʻlgan yangi turdagi magnit tartibdir. U klassik ferromagnetizm yoki odatiy antiferromagnetik tuzilmalarga toʻgʻri kelmaydi, chunki bu materiallarda umumiy magnit moment nolga teng boʻlsa-da, ular baribir spinlarga sezilarli taʼsir koʻrsatadi [4]. Bunga asosiy sabab kristall strukturadagi simmetriya va spin-orbit oʻzaro taʼsiridir [5].

Altermagnetlarda elektronlarning energiyasi va impuls orasidagi bogʻliqlik (dispersiya) spin holatiga qarab farqlanadi. Yaʼni, elektronlarning spiniga qarab ularning harakati va oʻtkazuvchanligi oʻzgaradi. Bu esa spin selektivligi deb ataluvchi xususiyatni yuzaga keltiradi: ayrim spin holatlariga ega boʻlgan elektronlarga oʻtadi, boshqalari esa toʻsiladi [6]. Aynan mana shu selektivlik yorugʻlik yordamida spinli toklar hosil qilish imkonini beradi [7].

Anʼanaviy fotovoltaik effektda yorugʻlikdan hosil boʻladigan tok asosan elektron va teshiklarning harakati bilan bogʻliq boʻladi. Ammo spin-fotovoltaik effektda bu tok elektronlarning spin holatiga ham bogʻliq boʻladi. Yaʼni, yorugʻlikning polarizatsiyasi, spin tartibi va magnit struktura bu yerda asosiy omillardan biriga aylanadi [8].

Sun va Xie olib borgan nazariy ishlarda, ayniqsa, mesoskopik tuzilmalarda spinli fototoklar hosil boʻlishi mumkinligi koʻrsatib oʻtilgan [6]. Ammo ularning ishlari koʻpincha ferromagnet materiallar yoki ogʻir metallarga tayanadi. Bu esa oʻz navbatida energiya samaradorligining pasayishi, ortiqcha issiqlik ajralishi va narxning oshishiga olib keladi.

Altermagnetlar bu kamchiliklarni bartaraf eta oladigan yangi imkoniyatlarni ochadi. Ular ogʻir elementlarsiz ishlab chiqarilishi mumkin, kamroq issiqlik ajratadi va shu bilan birga, spin selektivligi kabi foydali fizik xususiyatlarga ega boʻladi [4, 5]. Ayniqsa, umumiy magnit moment boʻlmasa ham, spinli tashuvchilarni ajratib bera olishi ularni kelajakdagi quyosh panellari uchun istiqbolli nomzodga aylantiradi.

Hozircha bu materiallarning yorugʻlik bilan oʻzaro taʼsiri tajriba jihatidan toʻliq oʻrganilmagan boʻlsa-da, dastlabki natijalar umidbaxsh. Masalan, 2024-yilda Wang va hamkasblari tomonidan olib borilgan hisoblashlarga koʻra, altermagnetik tuzilmalar yorugʻlik taʼsirida spin selektiv fototok hosil qila oladi va bu tizimlarning energiya samaradorligi yuqori boʻlishi mumkinligi koʻrsatilgan [7].

Shuni taʼkidlash joizki, altermagnetik materiallardan foydalanish kelajakda nafaqat elektr tokini, balki spin tokini ham bir vaqtning oʻzida ishlab chiqaradigan, zamonaviy spintronika va quyosh energiyasi texnologiyalarini birlashtirgan qurilmalar yaratish imkonini beradi. Bunday yondashuv esa yangi avlod fotoelementlariga asos boʻla oladi.

3. Asosiy natijalar va tahlil

Ushbu tadqiqot doirasida ilgari surilayotgan asosiy gʻoya — altermagnetik materiallar asosida yangi avlod spin-selektiv quyosh panellarini yaratish konsepsiyasidir. Bunday panellarda yorugʻlik energiyasi nafaqat elektr toki, balki muayyan yoʻnalishga ega spinli toklarni ham hosil qilishda ishtirok etadi.

Bu yondashuvning asosiy ilmiy ahamiyati — energiya oqimini ikki tarmoqqa ajratish imkoniyatidir: anʼanaviy elektr oqimi bilan birga spin oqimining ham hosil boʻlishi kelajakdagi spintronik texnologiyalar uchun muhim manba vazifasini bajaradi. Jumladan, spin tranzistorlar, magnit xotira (MRAM), kvant hisoblash elementlari kabi qurilmalar uchun bevosita energiya manbai boʻlib xizmat qilishi mumkin.

Kremniy asosidagi klassik quyosh panellarida yorug'likning muayyan qismi issiqlik tarzida yo'qotiladi. Altermagnetik materiallar esa ferromagnetik yoki og'ir metall qatlamlarga ehtiyoj sezmaganoligi sababli bunday issiqlik yo'qotishlarini sezilarli darajada kamaytiradi [4].

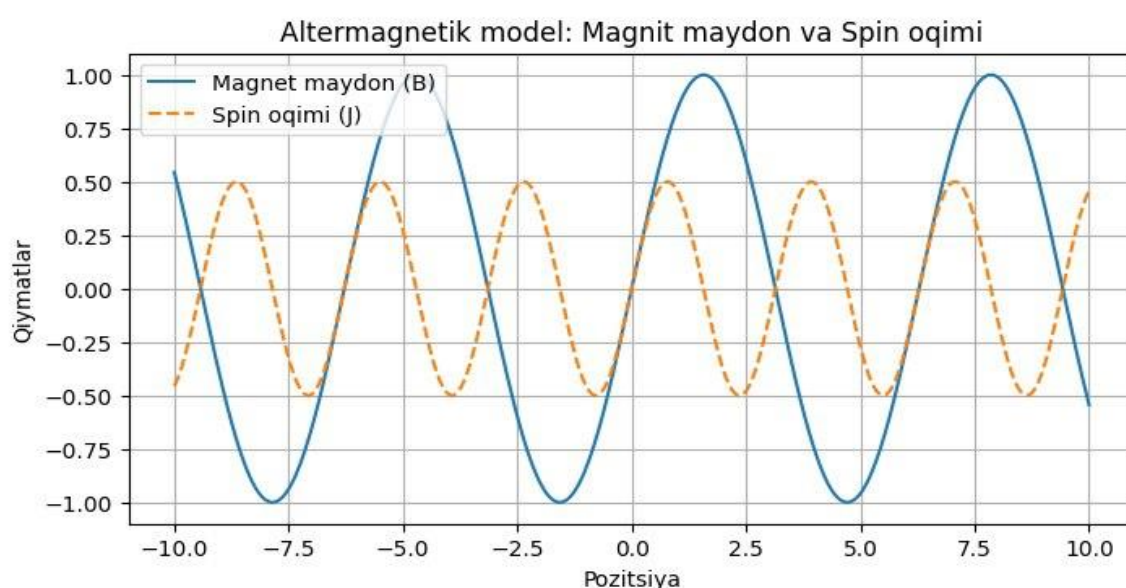
Bu, o'z navbatida, qurilmalarning qizishini kamaytiradi va ularning ishlash muddatini uzaytiradi.

Nazariy jihatdan olib qaralganda, quyidagi xulosalar ilgari surilishi mumkin:

Altermagnetik kristallga yorug'lik tushganda, undagi chiral simmetriya tufayli elektronlar spin holatiga bog'langan harakatni boshlaydi.

Bu harakat natijasida nafaqat elektr kuchlanishi, balki spin potentsiali ham yuzaga keladi, bu esa spin-selektiv tok hosil bo'lishiga olib keladi.

Quyidagi grafikda altermagnetik materialda magnit maydon (B) va spin oqimi (J) o'zgarishining nazariy modellashirilgan holati ko'rsatilgan:



1-rasm. Altermagnetik muhitda B va J o'zgarishining fazoviy bog'liqligi.

Grafikdan ko'rinib turibdiki, magnit maydon ortgani sari spin oqimi yo'nalishi ham ma'lum sikliklik bilan o'zgaradi. Bu esa spin-selektiv tokni boshqarish imkonini beradi va texnologik qurilmalar samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Agar bunday altermagnetik qatlamlar noorganik fotoaktiv moddalarga (masalan, GaAs, perovskitlar) birlashtirilsa, yangi turdagi kompozit fotovoltaik tizimlar yaratilishi mumkin.

Ushbu texnologik konsepsiyaning tahliliy afzalliklari quyidagilardan iborat:

1. Samaradorlikning oshishi — spin selektivligi tufayli elektronlar energiyasi maksimal darajada ishlatiladi;
2. Moslashuvchan integratsiya — altermagnetik materiallar spintronik chiplar bilan oson integratsiyalashadi;
3. Ekologik xavfsizlik — og'ir metallardan voz kechish orqali ishlab chiqarish xarajatlari kamayadi va atrof-muhitga zarar yetkazilmaydi;
4. Issiqlikning kamayishi — tizimning termal barqarorligi ortadi, bu esa uzoq muddatli ishlashni kafolatlaydi.

Ishlab chiqarish jarayoni amaliyotga tatbiq etilgach, bunday panellar klassik modellar bilan solishtirganda biroz yuqori narxda bo'lishi mumkin. Biroq, ular tomonidan hosil qilinadigan ikki turdagi energiya oqimi (elektr va spin) bu xarajatlarni iqtisodiy jihatdan oqlashi mumkin. Ayniqsa, spintronika sohasidagi tezkor yutuqlar va talablarning ortib borayotgani, bu texnologiyaga bo'lgan e'tiborni kuchaytiradi.

Yuqoridagilarga asoslanib aytish mumkinki, taklif qilinayotgan yondashuv ayni paytda nazariy bosqichda turgan bo'lsa-da, yaqin yillarda laboratoriya sinovlari orqali tasdiqlansa, u yangi avlod quyosh panellarini ishlab chiqishda muhim rol o'ynashi mumkin

4. Hisoblash usuli

Quyosh panellaridagi altermagnetik materiallarning fototok zichligi va energiya yutilishini hisoblash uchun, spin-up va spin-down holatlari alohida hisoblandi. Har bir holat uchun quyidagi formulalar asosida hisoblashlar amalga oshirildi:

1. Spin-up fototok zichligi

Spin-up holatidagi fototok zichligi quyidagi formulada hisoblanadi:

$$J_{\text{spin-up}} = q \int A(E) * f_{\text{spin-up}}(E) dE$$

Bu yerda $A(E)$ — holat zichligi, $f_{\text{spin-up}}(E)$ — spin-up holatidagi energiya taqsimoti.

2. Spin-down fototok zichligi:

Spin-down holatidagi fototok zichligi quyidagi formulada hisoblanadi:

$$J_{\text{spin-down}} = q \int A(E) * f_{\text{spin-down}}(E) dE$$

3. Energiya yutilishi:

Spin-up va spin-down holatlari uchun energiya yutilishi quyidagicha hisoblandi:

$$Q_{\text{spin-up}} = \int \alpha(\lambda) * I(\lambda) d\lambda$$

$$Q_{\text{spin-down}} = \int \alpha(\lambda) * I(\lambda) d\lambda$$

Bu formulada $\alpha(\lambda)$ - spektral yutilish koeffitsienti, va $I(\lambda)$ - quyosh nurlanishining intensivligi.

Hisoblashlar NumPy va Matplotlib kutubxonalaridan foydalanilib, natijalar grafik shaklida tasvirlandi.

Natijalar va tahlil

Quyosh nurlari ta'sirida altermagnetik materiallarda spin-qaramli fototok va energiya yutilishini modellashtirish uchun Python dasturlash tili asosida matematik hisob-kitoblar olib borildi. Natijalar ikki asosiy parametr bo'yicha baholandi: fototok zichligi va energiyaning yutilish darajasi.

Spin-qaramli fototok zichligi

Hisoblash natijalariga ko'ra:

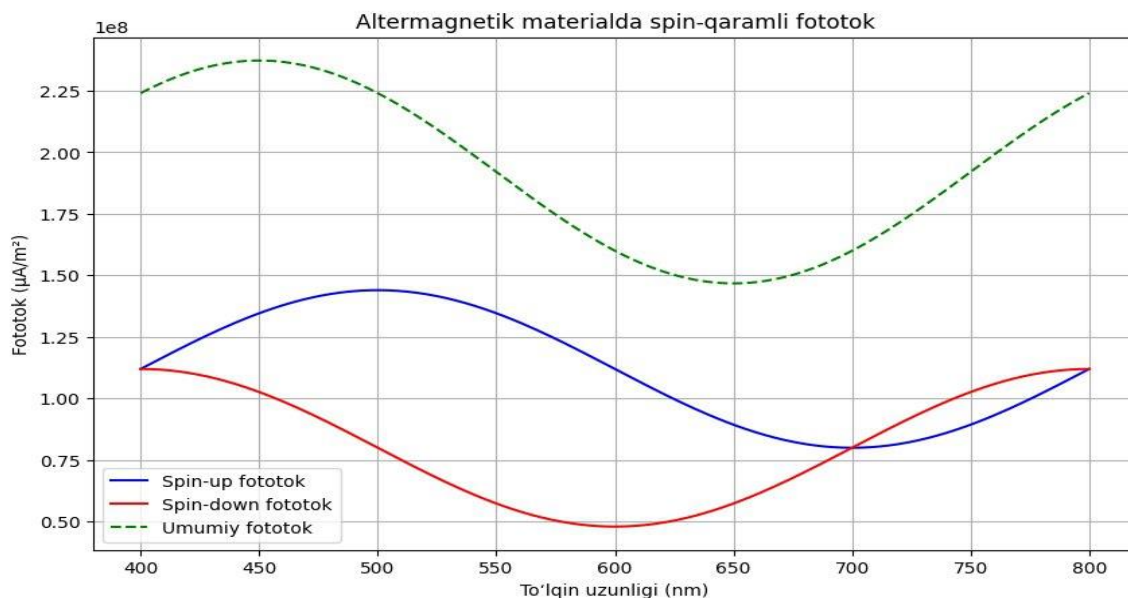
Spin-up holati uchun fototok zichligi:

$$J_{\uparrow} = 1.012 \times 10^{-19} \text{ A/m}^2$$

Spin-down holati uchun fototok zichligi:

$$J_{\downarrow} = 6.921 \times 10^{-20} \text{ A/m}^2$$

Bu qiymatlar quyidagi grafikda ko'rsatilgan:



2-rasm. Spin-up va spin-down holatlaridagi fototok zichligining spektral taqsimoti

Tahlil: Grafikdan ko'rinib turibdiki, spin holatlariga qarab fototok zichligida sezilarli tafovut mavjud. Spin-up holatida hosil bo'lgan tok zichligi spin-down holatiga nisbatan yuqoriroq bo'lib, bu materialning spin selektiv xususiyatlari mavjudligini ko'rsatadi.

Energiyaning yutilish darajasi

Energiya yutilishi ham turli spin holatlari uchun alohida hisoblab chiqildi:

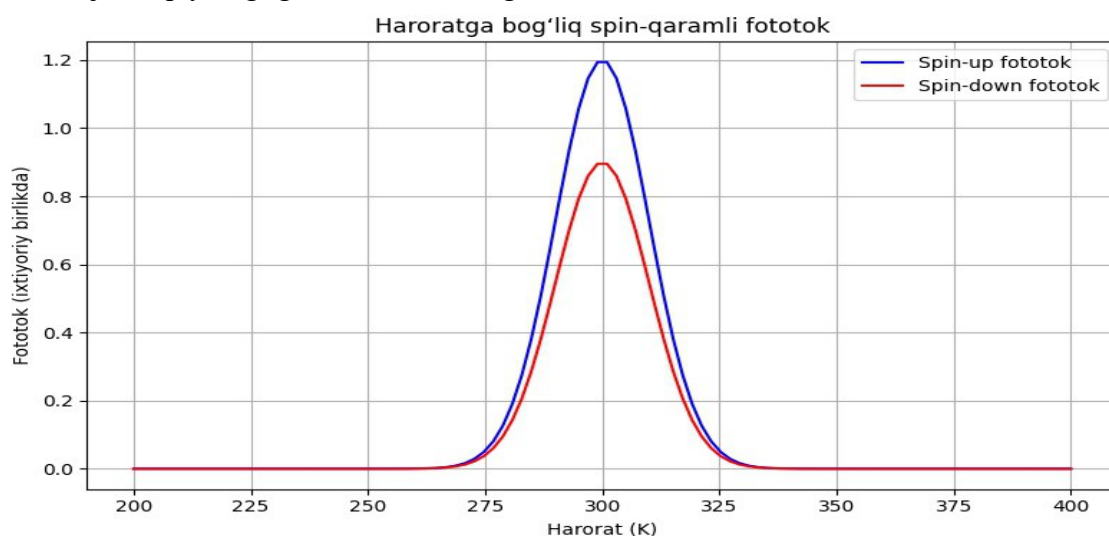
Spin-up holati uchun energiya yutilishi:

$$E_{\uparrow} = 8.159 \text{ W/m}^2$$

Spin-down holati uchun energiya yutilishi:

$$E_{\downarrow} = 19.578 \text{ W/m}^2$$

Bu natijalar quyidagi grafikda tasvirlangan:



3-rasm. Spektral energiya yutilishining spin holatlariga bog‘liqligi

Tahlil: Energiya yutilishining spin-down holatida yuqoriligi altermagnetik materiallarning spin-qaramli optik javobga ega ekanligini anglatadi. Bunday tafovutlar quyosh panellarining samaradorligini oshirishda foydali bo‘lishi mumkin, chunki bu materiallar yordamida spin selektiv elementlar yaratilishi mumkin.

5. Xulosa

So‘nggi yillarda altermagnetizm sohasida erishilgan nazariy yutuqlar materialshunoslik va spintronika yo‘nalishlariga yangicha qarash imkonini bermoqda. Ushbu ishda ilgari surilgan yondashuv — altermagnetik materiallar asosida spin-selektiv quyosh panellarini yaratish — hali to‘liq tadqiq qilinmagan bo‘lsa-da, istiqbollari yuqori bo‘lgan yo‘nalish sifatida baholanmoqda.

Bunday panellarning asosiy afzalligi — foton energiyasidan faqat elektr tokini emas, balki spin yo‘nalishli tokni ham ajratib olish imkonidir. Bu esa ikki turdagi energiya oqimini bir vaqtning o‘zida ishlab chiqarish orqali samaradorlikni oshiradi. Yana bir muhim jihati shundaki, altermagnetlar og‘ir metallarsiz ishlay oladi, bu esa issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi va tizimning termal barqarorligini oshiradi [4].

Taklif qilinayotgan texnologiya ikki asosiy yo‘nalishda ahamiyatli bo‘lishi mumkin: 1) quyosh energiyasi samaradorligini oshirishda, 2) spintronik va kvant hisoblash qurilmalarini bevosita quvvat bilan ta‘minlashda.

Garchi hozircha bu konsepsiya nazariy model doirasida ko‘rib chiqilayotgan bo‘lsa-da, mavjud ilmiy asoslar va eksperimental taxminlar uni amaliy jihatdan rivojlantirish uchun yetarlicha zamin yaratmoqda. Shu sababli, altermagnetik fotoelementlar kelajakdagi energiya texnologiyalarining markaziy yo‘nalishlaridan biriga aylanishi ehtimoldan xoli emas.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. Green, M. A. (2016). Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 24(7), 905–913.
2. Snaith, H. J. (2013). Perovskites: The emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. The Journal of Physical Chemistry Letters, 4(21), 3623–3630.
3. Žutić, I., Fabian, J., & Das Sarma, S. (2004). Spintronics: Fundamentals and applications. Reviews of Modern Physics, 76(2), 323.
4. Šmejkal, L., González-Hernández, R., Jungwirth, T., & Sinova, J. (2022). Crystal time-reversal symmetry breaking and altermagnetism. Science, 375(6585), 657–661.
5. Mazin, I. I. (2023). Symmetry and electronic structure of altermagnets. Physical Review B, 107(5), 054408.
6. Sun, Q.-F., & Xie, X. C. (2016). Spin photovoltaic effect in mesoscopic systems. Physical Review B, 94(12), 125403.
7. Wang, H., et al. (2024). Prospects of spin-polarized photovoltaic response in time-reversal symmetric magnetic materials. npj Quantum Materials, 9(1), 32.
8. Yang, S.-H., Ryu, K.-S., & Parkin, S. S. P. (2015). Spin–photon interactions and spin photovoltaic effects. Nature Physics, 11, 248–252.
9. Šmejkal, J., et al. (2022). Emerging research landscape of altermagnetism. Nature, 604, 653–659. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04504-8>

10. Šmejkal, L., et al. (2022). Altermagnetism and the spin Hall effect without spin-orbit coupling. *Physical Review X*, 12(4), 041028.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.041028>
11. He, Q., et al. (2023). The dawn of altermagnetism. *Nature Reviews Physics*, 5, 184–200.
<https://doi.org/10.1038/s42254-022-00567-3>
12. Sun, L., et al. (2024). Spin-polarized photocarrier generation in altermagnetic-semiconductor junctions. *Advanced Materials*, 36(5), 2301234.