NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-10]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

PYEZOELEKTRIKLARNING NANOTEXNOLOGIYADAGI O‘RNI

Ergasheva Muqaddasxon Abdumajitovna
Namangan davlat universiteti Fizika kafedrasi dotsenti
ORCID: 0009-0007-9704-952X E-mail:
E-mail: ergashevamukaddas76@gmail.com

Annotatsiya: *Ushbu maqolada pyezoelektrik materiallarning nanotexnologiyadagi o‘rni, fizik xususiyatlari va zamonaviy texnologiyalarda qo‘llanilish imkoniyatlari tahlil qilingan. Pyezoelektrik effektning fizik mohiyati, nanostrukturalarning o‘ziga xos xususiyatlari hamda rux oksidi (ZnO), qo‘rg‘oshin sirkonat-titanat (PZT) va polivinilidenftorid (PVDF) kabi materiallarning amaliy ahamiyati yoritilgan. Shuningdek, pyezoelektrik nanomateriallardan mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish, energiya yig‘uvchi nanogeneratorlar, yuqori sezgir sensorlar va o‘z-o‘zini quvvatlaydigan elektron qurilmalar yaratishda foydalanish imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Pyezoelektrik nanokompozitlarning istiqbollari, mavjud muammolari va kelajakdagi tadqiqot yo‘nalishlariga alohida e’tibor qaratilgan.*

Kalit so‘zlar: *pyezoelektrik effekt, nanotexnologiya, nanomateriallar, nanostruktura, pyezoelektrik nanogenerator, ZnO, PZT, PVDF, nanokompozit, energiya yig‘ish, sensor.*

РОЛЬ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

Аннотация: *В статье анализируются роль пьезоэлектрических материалов в нанотехнологиях, их физические свойства и возможности применения в современных технических устройствах. Рассматриваются физическая сущность пьезоэлектрического эффекта, особенности наноструктур, а также практическое значение таких материалов, как оксид цинка (ZnO), цирконат-титанат свинца (PZT) и поливинилиденфторид (PVDF). Особое внимание уделяется использованию пьезоэлектрических наноматериалов для преобразования механической энергии в электрическую, созданию наногенераторов, высокочувствительных сенсоров и электронных устройств с автономным энергоснабжением. Также обсуждаются перспективы развития пьезоэлектрических нанокомпозитов, существующие проблемы и направления дальнейших исследований.*

Ключевые слова: *пьезоэлектрический эффект, нанотехнологии, наноматериалы, наноструктуры, пьезоэлектрический наногенератор, ZnO, PZT, PVDF, нанокомпозит, сбор энергии, сенсор.*

THE ROLE OF PIEZOELECTRICS IN NANOTECHNOLOGY

Abstract: *This article examines the role of piezoelectric materials in nanotechnology, their physical properties, and their potential applications in modern technological devices. The physical principles of the piezoelectric effect and the distinctive characteristics of nanostructures are discussed, with particular attention to zinc oxide (ZnO), lead zirconate titanate (PZT), and polyvinylidene fluoride (PVDF). The article explores the application of piezoelectric nanomaterials in mechanical-to-electrical energy conversion, energy-harvesting nanogenerators, highly sensitive sensors, and self-powered electronic devices. Furthermore, the potential of piezoelectric nanocomposites, current technological challenges, and promising directions for future research are considered.*

Keywords: *piezoelectric effect, nanotechnology, nanomaterials, nanostructures, piezoelectric nanogenerator, ZnO, PZT, PVDF, nanocomposite, energy harvesting, sensor.*

Kirish

Hozirgi vaqtda nanotexnologiyaning jadal rivojlanishi yangi funksional materiallarni yaratish, ularning fizik-kimyoviy xususiyatlarini boshqarish va turli sohalarda qo‘llash imkoniyatlarini kengaytirmoqda. Ayniqsa, nanomateriallardan energiya samaradorligini oshirish, ixcham elektron qurilmalar ishlab chiqish, atrof-muhit parametrlarini nazorat qilish va zamonaviy sensor tizimlarini takomillashtirishda foydalanish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Shu nuqtayi nazardan, pyezoelektrik materiallar nanotexnologiyaning istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi.

Pyezoelektrik materiallar mexanik ta’sir natijasida elektr qutblanishi va elektr zaryadi hosil qilish xususiyatiga ega. Ushbu hodisa to‘g‘ri pyezoelektrik effekt deb ataladi. Aksincha, elektr maydoni ta’sirida materialning mexanik

deformatsiyalanishi teskari pyezoelektrik effekt deyiladi. Mazkur xususiyatlar mexanik va elektr energiyasi o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni ta’minlab, pyezoelektrik materiallardan energiya o‘zgartkichlari, aktuatorlar, sensorlar va nanogeneratorlar yaratishda foydalanish imkonini beradi.

Pyezoelektrik hodisa 1880-yilda fransuz olimlari Jak va Pyer Kyurilar tomonidan tajribalar orqali aniqlangan. Keyinchalik ushbu hodisaning fizik asoslari chuqur o‘rganilib, pyezoelektrik materiallardan turli texnik qurilmalarda foydalanish rivojlandi. Nanotexnologiyalarning taraqqiy etishi esa pyezoelektrik materiallarni nanosterjenlar, nanonaychalar, nanotolalar, yupqa qatlamlar va nanokompozitlar shaklida ishlab chiqish imkoniyatini yaratdi. Nanostrukturalarning o‘lchami, shakli, kristall tuzilishi va sirt xususiyatlarini boshqarish orqali ularning elektromexanik javobini ma’lum darajada o‘zgartirish mumkin. Masalan, rux oksidi (ZnO) nanostrukturalari yarimo‘tkazgichlik va pyezoelektrik xususiyatlarni birlashtirishi bilan ahamiyatlidir. Polivinilidenftorid (PVDF) asosidagi nanokompozitlar esa egiluvchanligi va turli shakllarga moslashtirilishi bilan ajralib turadi. Qo‘rg‘oshin sirkonat-titanat (PZT) keramikasi yuqori pyezoelektrik xususiyatlari tufayli ko‘plab sensor va elektromexanik qurilmalarda qo‘llaniladi.

Bugungi kunda elektr energiyasiga bo‘lgan ehtiyojning ortishi, kichik quvvatli elektron qurilmalar sonining ko‘payishi va ekologik monitoring tizimlarini takomillashtirish zarurati pyezoelektrik nanomateriallarni o‘rganishni yanada dolzarb qilmoqda. Ayniqsa, atrof-muhitdagi tebranish, bosim va boshqa mexanik ta’sirlardan energiya olish imkoniyatiga ega nanogeneratorlar hamda tashqi quvvat manbaiga bo‘lgan ehtiyojni kamaytirishga mo‘ljallangan sensorlar istiqbolli tadqiqot yo‘nalishlari hisoblanadi.

Maqolaning maqsadi pyezoelektrik materiallarning nanotexnologiyadagi o‘rnini ilmiy jihatdan tahlil qilish, ularning asosiy fizik xususiyatlarini yoritish va nanogeneratorlar, sensorlar hamda nanokompozit materiallar yaratishdagi imkoniyatlarini ko‘rib chiqishdan iborat.

Adabiyotlar tahlili

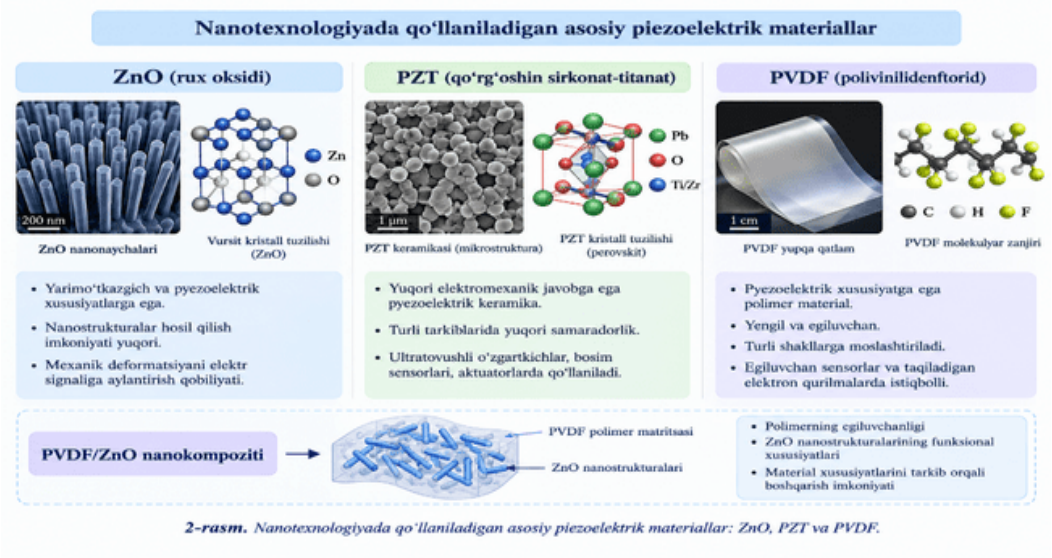
Pyezoelektrik materiallarning fizik xususiyatlari, nanostrukturalardagi elektromexanik hodisalar va ularning amaliy qo‘llanilishi ko‘plab ilmiy tadqiqotlarda o‘rganilgan. Ushbu yo‘nalishdagi izlanishlar pyezoelektrik effektning nazariy asoslarini rivojlantirish, nanomateriallar yordamida mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish hamda yangi avlod sensorlarini yaratishga qaratilgan.

Pyezoelektrik hodisaning ilmiy asoslari XIX asr oxirida Jak va Pyer Kyurilar tomonidan o‘rganilgan. 1880-yilda ular ayrim kristallarga mexanik bosim ta’sir ettirilganda elektr qutblanishi yuzaga kelishini tajribalar orqali aniqlaganlar. Ushbu kashfiyot keyinchalik pyezoelektrik materiallarning fizik xususiyatlarini o‘rganish va ulardan texnik qurilmalarda foydalanish uchun ilmiy asos yaratdi [1].



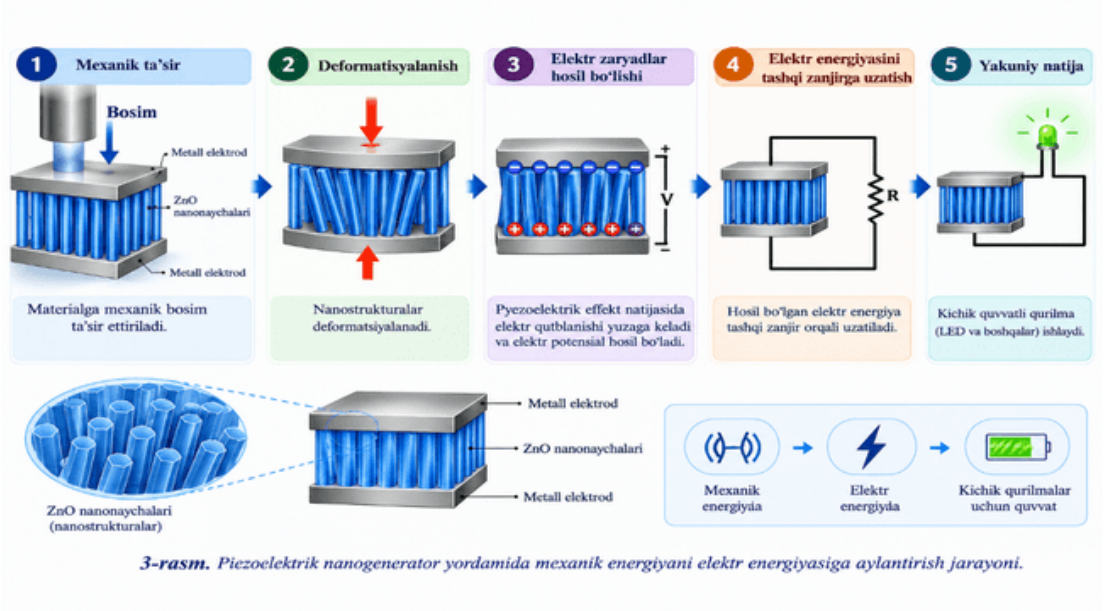
1-rasm. *To‘g‘ri va teskari piezoelektrik effektlarning fizik mexanizmi.*

Nanotexnologiya sohasida pyezoelektrik materiallardan foydalanishga qiziqish, ayniqsa, nanostrukturalarning o‘ziga xos elektr va mexanik xususiyatlari aniqlanishi bilan ortdi. Wang va Song 2006-yilda Science jurnalida e’lon qilgan tadqiqotlarida rux oksidi (ZnO) nanosterjenlari asosidagi pyezoelektrik nanogeneratorning ishlash prinsipini namoyish etdilar. Tadqiqotda nanostrukturalarning mexanik deformatsiyasi natijasida elektr potensial hosil bo‘lishi va undan elektr energiyasini yig‘ishda foydalanish imkoniyati ko‘rsatildi. Ushbu ish nanomateriallar asosidagi o‘z-o‘zini quvvatlaydigan tizimlarni rivojlantirishda muhim bosqich bo‘ldi [2].



2-rasm. *Nanotexnologiyada qo'llaniladigan asosiy piezoelektrik materiallar: ZnO, PZT va PVDF.*

Wang tomonidan 2008-yilda chop etilgan ilmiy maqolada o‘z-o‘zini quvvatlaydigan nanosistemalar uchun energiya yig‘ish texnologiyalari tahlil qilingan. Muallif mexanik tebranishlar va boshqa tashqi ta’sirlardan foydalanish orqali kichik o‘lchamli elektron qurilmalarni energiya bilan ta’minlash imkoniyatlariga e’tibor qaratgan. Ushbu yondashuv pyezoelektrik nanogeneratorlarning sensorlar va mustaqil ishlaydigan elektron tizimlar uchun ahamiyatini asoslashga yordam berdi [3].



3-rasm. *Piezoelektrik nanogenerator yordamida mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish jarayoni.*

Pyezoelektrik polimerlar bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlar ham muhim nazariy va amaliy natijalarni taqdim etgan. Kawai 1969-yilda polivinilidenftorid (PVDF) polimerining pyezoelektrik xususiyatlarini o‘rgangan. Ushbu tadqiqot egiluvchan polimer materiallardan elektr signalini hosil qiluvchi qurilmalar yaratish imkoniyatlarini kengaytirdi [4]. Keyingi ishlarda PVDF asosidagi materiallarning mexanik egiluvchanligi va elektromexanik xususiyatlaridan foydalanib, turli sensorlar hamda energiya yig‘uvchi qurilmalarni ishlab chiqish masalalari o‘rganildi.

Bowen va hammualliflar 2014-yilda e’lon qilgan tadqiqotlarida pyezoelektrik va ferroelektrik materiallarning energiya yig‘ish tizimlaridagi imkoniyatlarini tahlil qilganlar. Mualliflar mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish samaradorligiga material xususiyatlari, qurilma konstruksiyasi va ishlash sharoitlari ta’sir ko‘rsatishini ta’kidlaganlar [5].

Pyezoelektrik materiallarning yana bir muhim yo‘nalishi ularni nanokompozitlar tarkibida qo‘llashdir. Bunday materiallarda pyezoelektrik faza polimer yoki boshqa funksional komponentlar bilan birlashtiriladi. Natijada mexanik mustahkamlik, egiluvchanlik va elektromexanik javob kabi xususiyatlarni muayyan vazifaga moslashtirish imkoniyati paydo bo‘ladi. Xususan, PVDF va ZnO asosidagi kompozitlar egiluvchan sensorlar hamda nanogeneratorlar yaratish uchun istiqbolli materiallar sifatida o‘rganilmoqda [5].

Shuningdek, PZT kabi keramik materiallarning yuqori pyezoelektrik javobi ularni sanoat sensorlari, ultratovushli qurilmalar va aktuatorlarda qo‘llashga imkon beradi. Biroq tarkibida qo‘rg‘oshin mavjudligi ekologik xavfsizlik bilan bog‘liq muammolarni yuzaga keltiradi. Shu sababli qo‘rg‘oshinsiz pyezoelektrik materiallarni ishlab chiqish va ularning xususiyatlarini takomillashtirish bo‘yicha tadqiqotlar davom etmoqda [6].

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, pyezoelektrik nanomateriallar mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish, kichik o‘lchamli sensorlarni yaratish va o‘z-o‘zini quvvatlaydigan tizimlarni rivojlantirish uchun muhim ilmiy asosga ega. Shu bilan birga, materiallarning uzoq muddatli barqarorligi, energiya yig‘ish samaradorligi, ishlab chiqarish xarajatlari va ekologik xavfsizligini yaxshilash masalalari keyingi tadqiqotlar uchun dolzarb bo‘lib qolmoqda.

Tadqiqot metodologiyasi

Ushbu maqolada pyezoelektrik materiallarning nanotexnologiyadagi o‘rnini yoritish maqsadida nazariy tahlil va ilmiy adabiyotlarni o‘rganish usullaridan foydalanildi. Tadqiqotning metodologik asosini pyezoelektrik effektning fizik qonuniyatlari, nanomateriallarning tuzilishi hamda ularning elektromexanik xususiyatlariga oid ilmiy manbalarni qiyosiy o‘rganish tashkil etdi.

Dastlab pyezoelektrik effektning fizik mohiyati va uning to‘g‘ri hamda teskari ko‘rinishlari tahlil qilindi. Mexanik deformatsiya natijasida elektr qutblanishining yuzaga kelishi va elektr maydoni ta’sirida materialning deformatsiyalanishi o‘rtasidagi bog‘liqlik ko‘rib chiqildi. Bu yondashuv pyezoelektrik materiallarning energiya o‘zgartkichlari va sensorlardagi ishlash prinsipini tushuntirishga xizmat qildi [7].

Keyingi bosqichda ZnO, PZT va PVDF materiallarining fizik xususiyatlari hamda amaliy qo‘llanilish yo‘nalishlari tahlil qilindi. Materiallar kristall yoki molekulyar tuzilishi, elektromexanik xususiyatlari, mexanik moslashuvchanligi va texnologik imkoniyatlari nuqtayi nazaridan taqqoslandi. Bunda materiallarning afzalliklari bilan birga, ularni amaliyotda qo‘llash bilan bog‘liq cheklovlar ham hisobga olindi. Tadqiqot davomida qiyosiy tahlil, ilmiy umumlashtirish va tizimli yondashuv usullaridan foydalanildi. Qiyosiy tahlil orqali turli pyezoelektrik materiallarning o‘ziga xos jihatlari ajratib ko‘rsatildi. Ilmiy umumlashtirish yordamida mavjud adabiyotlarda keltirilgan natijalar bir tizimga keltirildi. Tizimli yondashuv esa materiallarning xususiyatlari, nanostrukturalarning shakli va qurilmalarning ishlash prinsipi o‘rtasidagi bog‘liqlikni yoritishga imkon berdi.

Shuningdek, pyezoelektrik nanogeneratorlarning ishlash mexanizmi nazariy jihatdan ko‘rib chiqildi. Mexanik ta’sir, material deformatsiyasi, elektr potensial hosil bo‘lishi va energiyani elektr zanjiriga uzatish bosqichlari o‘rganildi. Sensor texnologiyalariga oid adabiyotlar asosida pyezoelektrik materiallarning bosim, tebranish va boshqa mexanik ta’sirlarni aniqlashdagi imkoniyatlari baholandi [9].

Mazkur ish **nazariy-tahliliy tadqiqot** hisoblanadi. Unda yangi laboratoriya tajribalari o‘tkazilmagan, yangi material sintez qilinmagan va mustaqil miqdoriy o‘lchovlar amalga oshirilmagan. Shu sababli maqolada keltirilgan xulosalar tahlil qilingan ilmiy adabiyotlar va materiallarning ma’lum fizik xususiyatlariga asoslanadi.

Natijalar va ularning tahlili

Ilmiy adabiyotlarni tahlil qilish natijasida pyezoelektrik materiallarning nanotexnologiyadagi ahamiyati bir nechta asosiy yo‘nalishda namoyon bo‘lishi aniqlandi. Jumladan, mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish, sensorlarning sezgirligini ta’minlash, egiluvchan elektron qurilmalar yaratish va energiya jihatidan mustaqil tizimlarni rivojlantirish pyezoelektrik nanomateriallarning muhim qo‘llanilish yo‘nalishlari hisoblanadi.

Tahlil qilingan adabiyotlar asosida ZnO, PZT va PVDF materiallarining asosiy xususiyatlari hamda qo‘llanilish imkoniyatlari 1-jadvalda umumlashtirildi.

1-jadval.

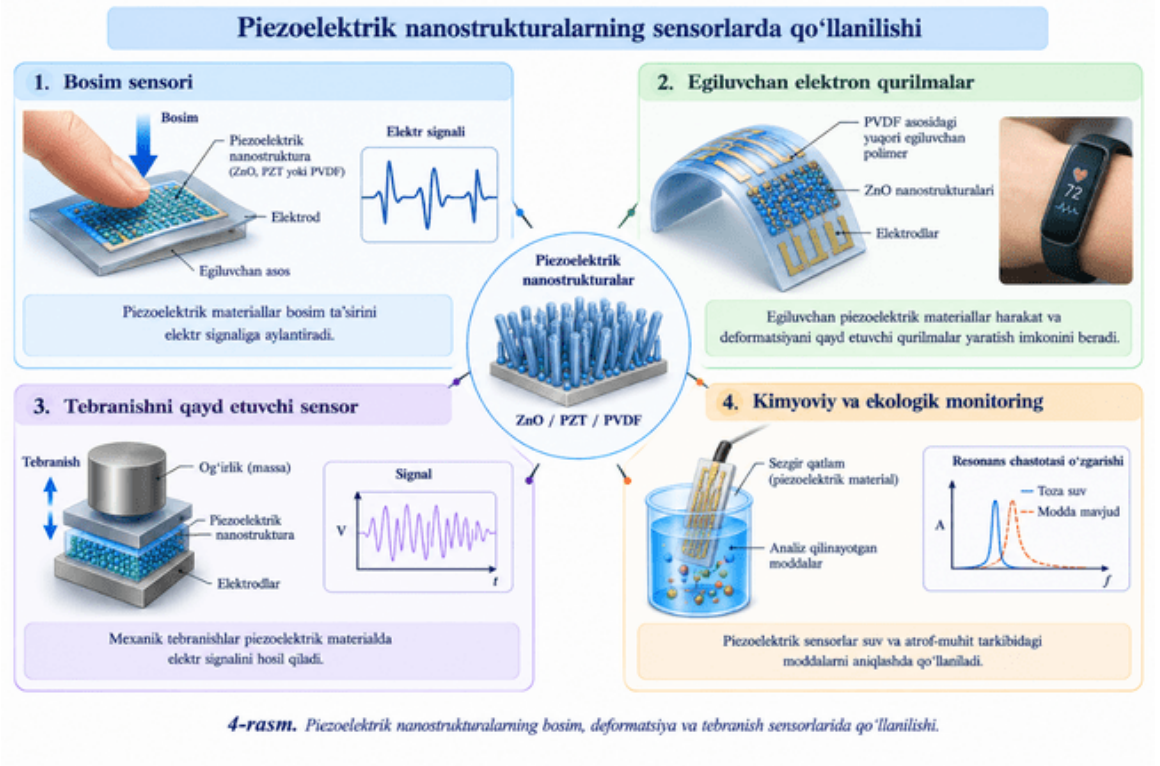
Pyezoelektrik materiallarning asosiy xususiyatlari va qo‘llanilishi

Material	Asosiy xususiyati	Afzalligi	Cheklovi	Qo‘llanilish sohasi
ZnO	Yarimo‘tkazgich va pyezoelektrik xususiyatlarga ega	Nanostrukturalar hosil qilish imkoniyati, funksional xususiyatlarning uyg‘unligi	Xususiyatlari kristall sifati va qurilma tuzilishiga bog‘liq	Nanogeneratorlar, sensorlar
PZT	Yuqori elektromexanik javobga ega pyezoelektrik keramika	Ko‘plab tarkiblarida yuqori pyezoelektrik samaradorlik	Tarkibida qo‘rg‘oshin mavjud	Ultratovushli qurilmalar, aktuatorlar, sensorlar

PVDF	Pyezoelektrik xususiyatga ega polimer	Yengil, egiluvchan va turli shakllarga moslashtiriladi	Xususiyatlari kristall fazasi va tayyorlash usuliga bog‘liq	Egiluvchan sensorlar, taqiladigan elektronika
PVDF/ZnO nanokompoziti	Polimer va nanoto‘ldirgich xususiyatlarini birlashtiradi	Material xususiyatlarini tarkib orqali boshqarish imkoniyati	Komponentlarning bir tekis taqsimlanishi va o‘zaro ta’siriga bog‘liq	Nanogeneratorlar, egiluvchan sensorlar

Jadvaldan ko‘rinadiki, pyezoelektrik materiallarni tanlashda barcha vazifalar uchun bir xil materialdan foydalanish maqsadga muvofiq emas. Masalan, yuqori elektromexanik javob talab qilinadigan ayrim qurilmalarda PZT samarali bo‘lishi mumkin, egiluvchan elektron tizimlarda esa PVDF afzalroq hisoblanadi. ZnO nanostrukturalari yarimo‘tkazgichlik va pyezoelektrik xususiyatlarni birgalikda ishlatish imkoniyati bilan ajralib turadi.

Shu bilan birga, jadval materiallarning umumiy xususiyatlarini ifodalaydi. Ularning aniq samaradorligi material tarkibi, tayyorlash usuli, geometrik o‘lchamlari, elektrodlar va foydalanish sharoitlariga bog‘liq. Adabiyotlar tahlili pyezoelektrik nanostrukturalardan mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirishda foydalanish mumkinligini ko‘rsatadi. Mexanik ta’sir natijasida pyezoelektrik materialda elektr qutblanishi o‘zgaradi va tegishli sharoitlarda elektr potensial hosil bo‘ladi. Tashqi elektr zanjiri mavjud bo‘lganda ushbu jarayondan energiya yig‘ish uchun foydalanish mumkin [10]. Wang va Song tomonidan o‘rganilgan ZnO nanosterjenlari asosidagi qurilma ushbu yondashuvning ilmiy asosini ko‘rsatuvchi muhim misoldir [2]. Mazkur tadqiqot nanostrukturalarning deformatsiyasidan foydalanib elektr signalini hosil qilish imkoniyatini namoyish etgan [4].



4-rasm. *Piezoelektrik nanostrukturalarning bosim, deformatsiya va tebranish sensorlarida qo‘llanilishi.*

Pyezoelektrik nanogeneratorlar kichik mexanik tebranishlar mavjud bo‘lgan muhitlarda sensorlarni energiya bilan ta’minlash uchun istiqbolli hisoblanadi. Biroq ularning amaliy samaradorligi mexanik energiya manbai, ta’sir chastotasi, materialning xususiyatlari va elektr energiyasini yig‘ish sxemasiga bog‘liq[8]. Shu sababli bunday qurilmalar barcha elektron tizimlar uchun yetarli energiya ishlab chiqaradi, degan xulosaga kelish mumkin emas.

Pyezoelektrik nanomateriallar tashqi mexanik ta’sirlarni elektr signaliga aylantirish imkoniyati tufayli sensor tizimlarida muhim ahamiyatga ega. Ular bosim, deformatsiya va tebranishlarni qayd etishda ishlatilishi mumkin. Nanostrukturalarning kichik o‘lchamlari va ularni ixcham qurilmalarga integratsiya qilish imkoniyati sensor texnologiyalarini takomillashtirishga yordam beradi. PVDF asosidagi egiluvchan materiallar harakat va deformatsiyalarni qayd etuvchi qurilmalar yaratish uchun qulaydir. PZT asosidagi sensorlar esa tegishli konstruksiyalarda yuqori elektromexanik javob talab qilinadigan vazifalarda qo‘llaniladi. ZnO nanostrukturalari mexanik va elektr hodisalarning o‘zaro ta’sirini o‘rganish uchun istiqbolli material hisoblanadi [2].

Kimyoviy va ekologik monitoringda pyezoelektrik materiallardan foydalanish ham muhim yo‘nalishlardan biridir. Masalan, suv tarkibidagi ayrim moddalarni aniqlash uchun pyezoelektrik transduserni maxsus selektiv qatlam bilan birlashtirish mumkin. Bunda aniqlanayotgan moddaning sezgir qatlam bilan o‘zaro ta’siri massa, rezonans chastotasi yoki boshqa o‘lchanadigan parametrlarning o‘zgarishiga olib kelishi mumkin. Biroq ma’lum ionlarni tanlab aniqlash uchun qo‘shimcha kimyoviy funksionalizatsiya, kalibrlash va tajribaviy tekshiruv talab etiladi. Tahlil natijalari pyezoelektrik nanokompozitlar materiallarning mexanik va elektromexanik xususiyatlarini boshqarish uchun istiqbolli yondashuv ekanini ko‘rsatadi. Polimer matritsaga pyezoelektrik nanostrukturalarni kiritish orqali egiluvchanlik, mexanik mustahkamlik va elektr javobini muayyan vazifaga moslashtirish mumkin [3].



5-rasm. PVDF/ZnO piezoelektrik nanokompozitining shartli tuzilishi va ishlash mexanizmi.

PVDF/ZnO kabi kompozitlarda polimerning egiluvchanligi va ZnO nanostrukturalarining funksional xususiyatlarini birlashtirish ko‘zda tutiladi. Biroq kompozitning yakuniy xususiyatlari komponentlarning miqdori, nanostrukturalarning bir tekis taqsimlanishi, kristall faza va ishlab chiqarish texnologiyasiga bog‘liq. Nanokompozitlarni amaliy qurilmalarda qo‘llashdan oldin ularning takroriy mexanik yuklamalarga chidamliligi, namlik va haroratga barqarorligi, elektr yo‘qotishlari hamda uzoq muddatli ishlash xususiyatlarini baholash lozim.

Umumiy tahlil shuni ko‘rsatadiki, pyezoelektrik nanomateriallar energiya yig‘ish va sensor texnologiyalarini rivojlantirish uchun katta imkoniyatlarga ega. Shu bilan birga, laboratoriya natijalarini amaliy qurilmalarga tatbiq etish uchun material xususiyatlarini standartlashtirish, ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirish va uzoq muddatli ishonchlilikni ta’minlash zarur.

Xulosa

Pyezoelektrik materiallar nanotexnologiyaning muhim funksional materiallari bo‘lib, ularning mexanik va elektr hodisalar o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni ta’minlash xususiyati turli zamonaviy qurilmalarni yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi. Mazkur maqolada pyezoelektrik effektning fizik mohiyati, ZnO, PZT va PVDF materiallarining xususiyatlari hamda ularning nanogeneratorlar, sensorlar va nanokompozitlarda qo‘llanilish imkoniyatlari ilmiy adabiyotlar asosida tahlil qilindi. Tahlil natijalari pyezoelektrik materiallarning qo‘llanilish imkoniyatlari ularning kimyoviy tarkibi, kristall yoki molekulyar tuzilishi, mexanik xususiyatlari va tayyorlash usullariga bog‘liqligini ko‘rsatdi. ZnO nanostrukturalari yarimo‘tkazgichlik va pyezoelektrik xususiyatlarni birlashtirishi bilan, PZT yuqori elektromexanik javobi bilan, PVDF esa egiluvchanligi va yengilligi bilan ajralib turadi.

Pyezoelektrik nanogeneratorlar mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish orqali kichik quvvatli elektron tizimlarni energiya bilan ta’minlash imkoniyatini yaratadi. Pyezoelektrik sensorlar esa bosim, deformatsiya va tebranishlarni aniqlashda muhim o‘rin tutadi. Nanokompozitlar yordamida materiallarning xususiyatlarini muayyan texnik vazifalarga moslashtirish mumkin.

Shu bilan birga, ushbu texnologiyalarning rivojlanishida energiya yig‘ish samaradorligi, materiallarning uzoq muddatli barqarorligi, ishlab chiqarish xarajatlari va ekologik xavfsizlik kabi masalalar muhimligicha qolmoqda. Kelgusida

qo‘rg‘oshinsiz pyezoelektrik materiallar, egiluvchan nanokompozitlar va yuqori samarali energiya yig‘ish tizimlarini ishlab chiqish bo‘yicha tadqiqotlarni rivojlantirish maqsadga muvofiq.

Xulosa qilib aytganda, pyezoelektrik materiallarni nanotexnologiya bilan uyg‘unlashtirish energiya tejamkor elektron qurilmalar, o‘z-o‘zini quvvatlaydigan sensorlar va aqlli monitoring tizimlarini yaratish uchun istiqbolli ilmiy-texnologik yo‘nalish hisoblanadi.

Mualliflar hissasi, manfaatlar to‘qnashuvi va moliyalashtirish

Mualliflar hissasi: Ergasheva Muqaddasxon Abdumajitovna maqola mavzusini tanlash, ilmiy adabiyotlarni o‘rganish va tahlil qilish, tadqiqot metodologiyasini belgilash, olingan ma’lumotlarni umumlashtirish hamda maqola matnini tayyorlash va tahrirlash ishlarini amalga oshirdi. Manfaatlar to‘qnashuvi: Muallif ushbu maqolani tayyorlash va nashr etish bilan bog‘liq manfaatlar to‘qnashuvi mavjud emasligini ma’lum qiladi. Moliyalashtirish: Mazkur tadqiqot tashqi moliyaviy ko‘mak yoki grant mablag‘larisiz amalga oshirilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Teshaboyev A., Zaynobiddinov S., Ermatov Sh. Qattiq jismlar fizikasi. — Toshkent: O‘zbekiston, 2001.

[2] Muslimov N.A. va boshqalar. Nanotexnologiya asoslari. — O‘quv qo‘llanma. — Toshkent.

[3] Jo‘rayev M., Sattorov A. Umumiy fizika kursi. — Toshkent.

[4] Fizika: ensiklopedik lug‘at. — Toshkent: O‘zbekiston milliy ensiklopediyasi.

[5] Materialshunoslik va yangi materiallar texnologiyasi. — O‘quv qo‘llanma. — Toshkent.

[6] Головнин В.А. и др. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. — 2013. — 271 с.

[7] Нагаенко А.В. Пьезоэлектрики. Основные параметры и технология получения: учебное пособие. — 2021. — 103 с.

[8] Wang, Z.L., Song J. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays // *Science*. — 2006. — Vol. 312, No. 5771. — P. 242–246. — DOI: 10.1126/science.1124005.

[9] Kawai, H. The Piezoelectricity of Poly(vinylidene Fluoride) // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 1969. — Vol. 8. — P. 975–976. — DOI: 10.1143/JJAP.8.975.

[10] Bowen, C.R., Kim, H.A., Weaver, P.M., Dunn, S. Piezoelectric and Ferroelectric Materials and Structures for Energy Harvesting Applications // *Energy & Environmental Science*. — 2014. — Vol. 7. — P. 25–44. — DOI: 10.1039/C3EE42454E.