

**EXPERIMENTAL STUDY AND COMPUTATIONAL SIMULATIONAL ON THE
RESISTIVITY ANISOTROPY OF METAL AND SEMICONDUCTOR SINGLE
CRYSTALS****Toshpulatov Ogabek , son of Ulugbek****Institute of Engineering Physics, Samarkand State University Named after Sharof****Rashidov 1st year Master's degree in Physics****toshpulatovogabek38@gmail.com**

Annotation. Electrical resistivity anisotropy in metal and semiconductor single crystals is an important research subject in the fields of materials science and electronics. This phenomenon is related to crystal symmetry and electron dispersion, reflecting differences in electron flow along various crystallographic directions. Experimental studies, particularly the four-point probe technique, Hall effect measurements, and magnetotransport methods, are used to measure direction-dependent resistivity in single crystals.

In addition, computer modeling methods—such as Density Functional Theory (DFT), molecular dynamics, and tight-binding models—make it possible to determine electron density, phonon scattering, and transport processes. Modern approaches combine experimental results with theoretical models to predict anisotropic properties in metals and semiconductors and to design new nanoelectronic devices.

The research findings have practical significance in the study of electron transport mechanisms, high-precision semiconductors, and nanoelectronic devices. This article briefly analyzes the current state and methodological approaches to studying electrical resistivity anisotropy in single crystals.

Keywords: electrical resistivity anisotropy, metal single crystals, semiconductor single crystals, four-point probe technique, Hall effect, computer modeling, DFT (Density Functional Theory), molecular dynamics, nanoelectronics, transport properties.

**METALL VA YARIMO'TKAZGICH MONOKRISTALLARIDA ELEKTR
QARSHILIGI ANIZOTROPIYASINI EKSPERIMENTAL TADQIQ ETISH VA
KOMPYUTER MODELLASHTIRISHNING BUGUNGI KUNDAGI HOLATI****Toshpo'latov Og'abek Ulug'bek o'g'li****Sharof Rashidov Nomidagi****Samarqand davlat universitetining muhandislik fizika instituti****Fizika yo'nalishi 1-kurs magstri****toshpolatovogabek38@gmail.com****+998(88)4257225**



Annotatsiya. Metall va yarimo‘tkazgich monokristallarida elektr qarshiligi anizotropiyasi materialshunoslik va elektronika sohalarida muhim tadqiqot obyekti hisoblanadi. Bu hodisa kristall simmetriyasi va elektron dispersiyasiga bog‘liq bo‘lib, turli yo‘nalishlarda elektron oqimi o‘tishidagi farqlarni aks ettiradi. Eksperimental tadqiqotlar, xususan, 4-nuqta prob texnikasi, Xoll-effekt va magnetotransport metodlari yordamida monokristallar yo‘nalishlariga bog‘liq qarshilik o‘lchanadi. Shu bilan birga, kompyuter modelashtirish metodlari — DFT, molekulyar dinamika va tight-binding modellar — elektron zichlik, fonon tarqalishi va transport jarayonlarini aniqlash imkonini beradi. Zamonaviy yondoshuvlar eksperiment va nazariy modellarni birlashtirish orqali metall va yarimo‘tkazgichlarda anizotropiya xususiyatlarini oldindan bashorat qilish va yangi nanoelektron qurilmalarni loyihalash imkonini beradi. Tadqiqot natijalari elektron transport mexanizmlari, yuqori aniqlikdagi yarimo‘tkazgichlar va nanoelektronika qurilmalari sohasida amaliy ahamiyatga ega. Ushbu maqola monokristalllarda elektr qarshiligi anizotropiyasini o‘rganishning bugungi kundagi holati va metodologik yondoshuvlarni qisqacha tahlil qiladi.

Kalit so‘zlar: elektr qarshiligi anizotropiyasi, metall monokristallari, yarimo‘tkazgich monokristallari, 4-nuqta prob texnikasi, Xoll-effekt, kompyuter modelashtirish, DFT (density functional theory), molekulyar dinamika, nanoelektronika, transport xususiyatlari.

Metall va yarimo‘tkazgich monokristallari bugungi kundagi elektronika va materialshunoslik sohasida muhim tadqiqot obyekti hisoblanadi. Ularning elektr qarshiligi anizotropiyasi — ya’ni elektr toki o‘tishidagi yo‘nalishga bog‘liq qarshilik farqlari — materiallarning kristall tuzilishi va elektron dispersiya qonuniyatlari bilan bog‘liq murakkab fizik hodisadir. Bu hodisa yuqori sifatli yarimo‘tkazgich qurilmalarini loyihalash, kvant elektronika va nanoelektronika sohalarida muhim ahamiyatga ega.

Anizotropiya tadqiqoti eksperimental va nazariy yondoshuvlarni birlashtiradi. Eksperimental usullar orqali monokristallarning elektr xususiyatlari o‘lchanadi, kompyuter modelashtirish esa elektron zichlik va kristall panjara xususiyatlarini tahlil qilish imkonini beradi. Bugungi kunda atom darajali modelashtirish, molekulyar dinamika, kvant mexanik modellari va elektron dispersiya hisob-kitoblari anizotropiya tahlilini sezilarli darajada rivojlantirdi.

Mazkur tezisda metall va yarimo‘tkazgich monokristallarida elektr qarshiligi anizotropiyasini o‘rganishning eksperimental va kompyuter modelashtirish yo‘nalishlari, ilmiy maqolalar va so‘nggi natijalar tahlil qilinadi, shuningdek, ularning zamonaviy holati va kelajak istiqbollari ko‘rib chiqiladi.

So‘nggi yillarda elektr qarshiligi anizotropiyasi bo‘yicha ko‘plab ilmiy ishlar olib borilgan. Masalan, Ashcroft va Mermin (1976) metall kristallari uchun elektron gaz modelini ishlab chiqqan bo‘lsa, Ziman (2001) yarimo‘tkazgichlarda anizotrop transport xususiyatlarini tahlil qilgan. Bu tadqiqotlar asosan eksperimental ma’lumotlar va analitik hisob-kitoblarni o‘z ichiga oladi.[2]



Yarimo'tkazgich monokristallarida (Si, Ge, GaAs) elektr qarshiligi anizotropiyasi elektron effektlar bilan chambarchas bog'liq. Kittel (2004) o'z ishida bunday anizotropiyaning kristall yo'nalishiga bog'liq ekanligini ko'rsatgan. Shu bilan birga, so'nggi yillarda ab initio modellashirish metodlari (DFT – Density Functional Theory) yordamida elektron zichlik va mobilitet hisob-kitoblari amalga oshirilmoqda (Hohenberg & Kohn, 1964; Kohn & Sham, 1965).[5]

Metall monokristallari uchun esa elektr qarshiligi anizotropiyasini tadqiq etishda Matthiessen qonuni va elektron-fonon o'zaro ta'siri asosiy rol o'ynaydi (Ashcroft, 1976). Shu bilan birga, eksperimental usullar (Hall-effekt, to'liq tok o'lchash, 4-nuqta prob texnikasi) anizotropiyaning yo'nalishga bog'liq xususiyatlarini aniqlashda keng qo'llaniladi (Hurd, 1972; Smith, 2010).

Bugungi kunda kompyuter modellashirish sohasida VASP, Quantum ESPRESSO va ABINIT kabi dasturlar keng qo'llanilmoqda. Bu dasturlar yordamida kristall panjara va elektron dispersiya hisob-kitoblari amalga oshiriladi, shuningdek, turli yo'nalishlardagi elektr qarshiligi anizotropiyasi oldindan bashorat qilinadi (Giannozzi et al., 2009; Kresse & Furthmüller, 1996).

Elektr qarshiligi anizotropiyasi — bu kristall tuzilishidagi simmetriya va elektron fazoviy dispersiyasiga bog'liq xususiyat. Monokristallarda elektronlar har xil yo'nalishlarda turlicha o'tadi, shuning natijasida qarshilik ham yo'nalishga bog'liq ravishda o'zgaradi.

Yarimo'tkazgichlarda, masalan, Si monokristallarida konduksiya uchun asosiy yo'nalishlar [100], [110], [111] hisobga olinadi. Elektr mobiliteti va qarshilik koeffitsienti ushbu yo'nalishlarga bog'liq bo'lib, fonon tarqalishi va defektlar bilan o'zaro ta'sir qiladi. Metall monokristallarida esa elektron fonon tarqalishi va Fermi sathi geometriyasi asosiy rol o'ynaydi.[2]

Eksperimental tadqiqotlar odatda quyidagi metodlarga tayanadi:

To'rt nuqtali zond texnikasi – bu usul yordamida monokristallning turli yo'nalishlarida qarshilik aniqlanadi. Problar orasidagi masofa aniq o'lchanadi va elektron oqimining yo'nalishiga qarab qarshilik o'lchanadi.[1]

Xoll-effekt o'lchash – bu usul elektron zichligi va mobilitetni aniqlash orqali anizotropiya tahlilini amalga oshirishga imkon beradi.

Magnetotransport tadqiqotlari – yuqori magnit maydonlarda o'tkazilib, elektron orbitasi va effektlarni aniqlashga yordam beradi.

Eksperimentlar shuni ko'rsatdiki, monokristallar qarshiligi yo'nalishga bog'liq ravishda sezilarli darajada farqlanadi. Masalan, [111] yo'nalishida qarshilik [100] yo'nalishiga nisbatan 1,2–1,5 marta katta bo'lishi mumkin.

Kompyuter modellashirishning asosiy maqsadi — eksperiment natijalarini tushuntirish va yangi materiallarda anizotropiya xususiyatlarini bashorat qilish.

Ab initio modellashirish – elektron zichlik va kristall energiyasi hisob-kitoblari amalga



oshiriladi. DFT metodlari yordamida turli yo'nalishlarda elektron o'tish tezligi va qarshilik aniqlanadi.

Molekulyar dinamika – fonon va elektron o'zaro ta'sirini tahlil qiladi, issiqlik va tok transportini simulyatsiya qiladi.

Tarmoqli modellar (Tight-binding) – bu metod yordamida elektron dispersiya hisoblanadi va anizotrop transport xususiyatlari aniqlanadi.

Yaqinda o'tkazilgan tadqiqotlarda, masalan, GaAs va Si monokristallari uchun DFT modellashtirish natijalari eksperiment bilan juda yaqin chiqqan (Wang et al., 2019). Metall monokristallarida esa elektron fonon ta'siri hisob-kitoblari orqali anizotropiya prognoz qilindi (Zhou et al., 2021).[5]

Bugungi kundagi tendensiyalar quyidagilardan iborat:

Atom darajasida transport modellashtirish: Nanoelektronika qurilmalari uchun aniq transport xususiyatlarini aniqlash.

Yangi materiallarni tadqiq qilish: 2D-materiallar (grafen, MoS₂) va to'qimalar anizotropiyaning noyob xususiyatlarini ko'rsatmoqda.

Eksperimental va nazariy metodlarni integratsiyasi: Eksperiment natijalarini DFT va MD bilan birlashtirish, yuqori aniqlikdagi prognozlar olish.[4]

Sun'iy intellekt yondoshuvlari: Ma'lumotlar bazalaridan foydalangan holda anizotropiya xususiyatlarini bashorat qilish.

Eksperiment va modellashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki, metall va yarimo'tkazgich monokristallarida elektr qarshiligi anizotropiyasi kristall simmetriyasi, elektron dispersiyasi va fonon tarqalishi bilan chambarchas bog'liq.

Yarimo'tkazgichlarda anizotropiya eng ko'p konduksiya kanallari bilan bog'liq, ya'ni elektronlarning turli yo'nalishlarda harakatlanish tezligi farq qiladi. Metall monokristallarida esa Fermi sathi geometriyasi va elektron fonon tarqalishi asosiy ta'sir qiladi.

Eksperimental metodlar yuqori aniqlik bilan qarshilik farqlarini aniqlasa-da, kompyuter modellashtirish kompleks fizik jarayonlarni tushuntirishga yordam beradi. Shu bilan birga, DFT va molekulyar dinamika metodlari turli kristall yo'nalishlaridagi qarshilikni oldindan bashorat qilish imkonini beradi.[6]

Tahlil shuni ko'rsatadiki, kelajakda atom darajasidagi modellashtirish va eksperimentlarni integratsiya qilish orqali yangi materiallar va nanoelektron qurilmalar ishlab chiqish samaradorligi oshadi.

Xulosa qilib aytganda, bugungi kunda metall va yarimo'tkazgich monokristallarida elektr qarshiligi anizotropiyasi eksperimental va kompyuter modellashtirish metodlari orqali muvaffaqiyatli tadqiq etilmoqda. Eksperimentlar monokristall yo'nalishlariga bog'liq qarshilik farqlarini aniqlasa, modellashtirish esa fizik jarayonlarni chuqur tushuntirish imkonini beradi.

Zamonaviy yondoshuvlarda DFT, molekulyar dinamika va tight-binding modellar birlashib,



yangi materiallarda anizotrop xususiyatlarni bashorat qilish imkonini beradi. Shu bilan birga, nanoelektronika va 2D-materiallarda anizotropiyaning yangi xususiyatlari ilmiy va texnologik jihatdan katta qiziqish uyg'otmoqda.

Kelajak tadqiqotlari eksperiment va nazariy metodlarni integratsiyalash, sun'iy intellekt yordamida modellashtirish va atom darajasida transport jarayonlarini o'rganishga qaratilishi kutilmoqda. Bu esa elektronika, optoelektronika va kvant texnologiyalarining rivojlanishida muhim o'rin tutadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Ziman, J. M. Principles of the Theory of Solids. Cambridge University Press, 2001.
2. Zhou, Y., et al. Electron-phonon interaction and resistivity anisotropy in metallic crystals: A computational study. Phys. Rev. B, 103, 245202, 2021
3. Wang, H., et al. Ab initio study of anisotropic electronic transport in Si and GaAs monocrystals. J. Appl. Phys., 125, 045701, 2019.
4. Abduqodirov, S. Yarimo'tkazgichlar fizikasi va transport hodisalari. Toshkent: Fan, 2015, 210 bet.
5. Axmedov, T. Metall monokristallarida elektr qarshiligi va anizotropiya. Toshkent: O'zbekiston Milliy Universiteti Nashriyoti, 2018, 185 bet.
6. Xolmatov, R. Kompyuter modellashtirish va elektron transport xususiyatlari. Toshkent: Ilmiy Nashr, 2020, 232 bet.