Qabul qilindi: 5-noyabr 2026-yil • Ma’qullandi: 8-noyabr 2026-yil • Nashr qilindi: 10-noyabr 2026-yil

YARIMO‘TKAZGICHLI MATERIALLARDA ISSIQLIK O‘TKAZUVCHANLIKNING HARORATGA BOG‘LIQLIGI VA FONON SOCHILISH MEXANIZMLARI

Komiljonova Gulhayo Jaloliddin qizi

Fizika yo‘nalishi

Annotatsiya. Ushbu tezisda yarimo‘tkazgichli materiallarda issiqlik o‘tkazuvchanlikning haroratga bog‘liqligi nazariy jihatdan tahlil qilingan. Issiqlik uzatishda kristall panjara tebranishlari — fononlarning roli, ularning sochilish mexanizmlari (chegaraviy, nuqsonlardan, fonon–fonon va elektron–fonon sochilishi) ko‘rib chiqilgan. Turli haroratlar oralig‘ida κ(T) bog‘liqligining xarakteri tushuntirilgan, ayrim keng tarqalgan yarimo‘tkazgichlarning xona haroratidagi issiqlik o‘tkazuvchanligi taqqoslangan.

Kalit so‘zlar: yarimo‘tkazgich, issiqlik o‘tkazuvchanlik, fonon, Umklapp jarayoni, Debay harorati, Matissen qoidasi, termoelektrik materiallar.

1. Kirish

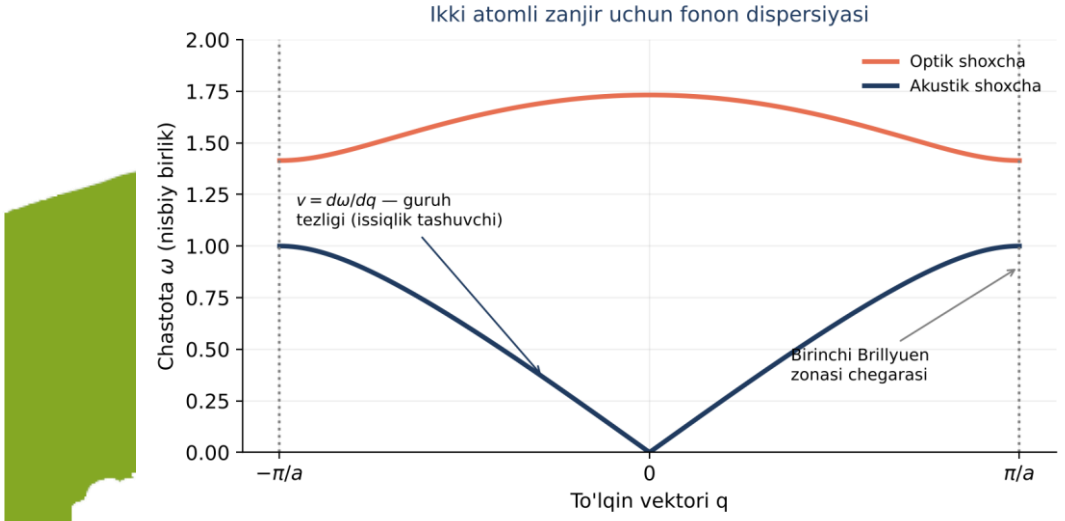
Zamonaviy elektronika, energetika va axborot texnologiyalarining rivoji yarimo‘tkazgichli materiallar bilan uzviy bog‘liq. Integral sxemalardagi tranzistorlar o‘lchamining kamayishi va quvvat zichligining ortishi qurilma ichida ajraladigan issiqlikni samarali chiqarib yuborish masalasini birinchi darajali vazifaga aylantirdi. Agar material issiqlikni yetarlicha tez tarqata olmasa, qurilma qizib ketadi, uning ishonchliligi va xizmat muddati keskin pasayadi.

Shu sababli yarimo‘tkazgichlarda issiqlik o‘tkazuvchanlik mexanizmlarini va uning haroratga bog‘liqligini o‘rganish ham fundamental, ham amaliy ahamiyatga ega. Tezisning maqsadi — issiqlik o‘tkazuvchanlikni belgilovchi asosiy fizik omillarni aniqlash va κ(T) bog‘liqligining harorat bo‘yicha qonuniyatlarini tahlil qilishdir.

2. Issiqlik tashuvchilar: fononlar

Yarimo‘tkazgich va dielektriklarda erkin zaryad tashuvchilar kam bo‘lgani uchun

issiqlik asosan kristall panjara atomlarining kollektiv tebranishlari — fononlar orqali uzatiladi. Fononlar kvazizarracha bo‘lib, ularning energiyasi E = ħω, kvazimpulsi esa ħq ga teng. Fononlarning chastotasi ω va to‘lqin vektori q orasidagi bog‘liqlik dispersiya qonuni deyiladi (1-rasm).



1-rasm. Ikki atomli zanjir modeli uchun fonon dispersiyasi: akustik va optik shoxchalar.

Issiqlik uzatishda asosiy hissani akustik shoxcha fononlari qo‘shadi, chunki ularning guruh tezligi v = dω/dq eng katta. Optik fononlarning guruh tezligi kichik bo‘lgani sababli ular issiqlik tashishda deyarli qatnashmaydi, biroq akustik fononlarni sochishda muhim rol o‘ynaydi.

3. Nazariy asos

Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsienti kinetik nazariyaga ko‘ra fonon gazi uchun quyidagicha ifodalanadi:

$$\kappa = (1/3) \cdot C \cdot v \cdot l \quad (1)$$

bu yerda C — panjaraning hajm birligidagi solishtirma issiqlik sig‘imi, v — fononlarning o‘rtacha (tovush) tezligi, l — fononlarning erkin yugurish yo‘li. Haroratning o‘zgarishi bilan C va l kattaliklar turlicha o‘zgaradi, shu sababli κ(T) bog‘liqlik murakkab ko‘rinishga ega bo‘ladi.

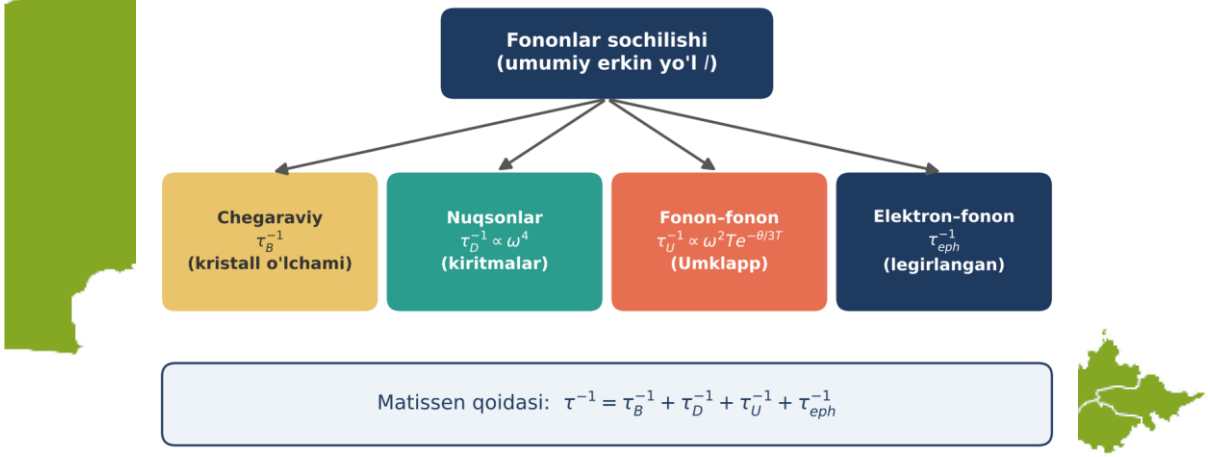
Debay modeliga muvofiq past haroratlarda ($T \ll \theta$) issiqlik sig‘imi $C \propto T^3$ qonuni bo‘yicha o‘zgaradi, yuqori haroratlarda ($T \gg \theta$) esa Dyulong–Pti qonuniga ko‘ra o‘zgarmas

qiymatga intiladi ($C \approx 3nk_B$). Bu yerda θ — Debay harorati.

Fononlarning umumiy erkin yugurish yo‘li turli sochilish jarayonlari hissalarining yig‘indisi sifatida Matissen qoidasi bilan aniqlanadi:

$$1/l = 1/l_B + 1/l_D + 1/l_U + 1/l_{ef} \quad (2)$$

Bu yerda indekslar mos ravishda chegaraviy (B), nuqsonlardan (D), fonon–fonon Umklapp (U) va elektron–fonon (ef) sochilishlarini bildiradi. Sochilish mexanizmlarining umumiy sxemasi 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Fononlarning sochilish mexanizmlari va Matissen qoidasi.

4. Issiqlik o‘tkazuvchanlikning harorat bo‘yicha xarakteri

4.1. Past haroratlar

Juda past haroratlarda fonon–fonon sochilishi deyarli yo‘qoladi va erkin yugurish yo‘li namuna o‘lchamlari bilan chegaralanadi (Kazimir rejimi). Bunda l = const bo‘lgani uchun κ harorat bo‘yicha issiqlik sig‘imiga o‘xshab, taxminan T^3 qonuniga muvofiq ortadi.

4.2. O‘rtacha haroratlar va maksimum

Harorat ortishi bilan fononlar soni ko‘payadi va ular o‘zaro Umklapp jarayonlari orqali sochila boshlaydi. Natijada erkin yugurish yo‘li qisqaradi, issiqlik sig‘imi esa hali o‘sishda davom etadi. Bu ikki omil raqobati tufayli κ(T) egri chizig‘ida maksimum hosil bo‘ladi. Maksimum odatda $T \approx \theta/20 \ldots \theta/10$ oralig‘ida kuzatiladi. Toza va mukammal kristallarda u yuqori va tor, kiritma hamda nuqsonlari ko‘p namunalarda esa pastroq va yoyilgan bo‘ladi.

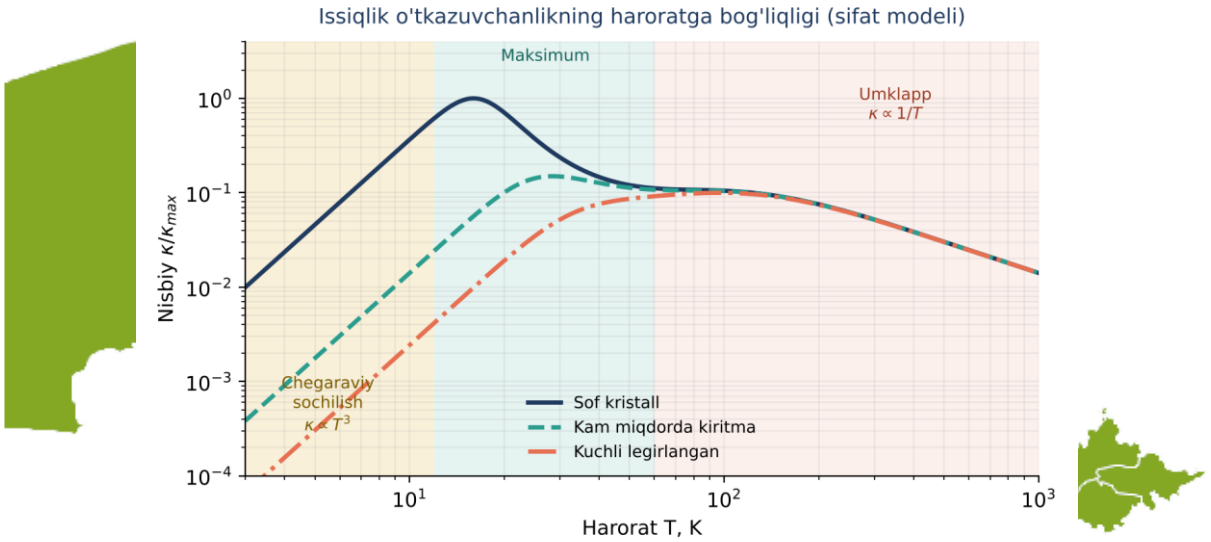
4.3. Yuqori haroratlar

$T \gtrsim \theta$ da issiqlik sig‘imi to‘yinadi, fonon–fonon sochilishi esa tebranishlar sonining

ortishi sababli kuchayadi: l ∝ 1/T. Natijada issiqlik o‘tkazuvchanlik harorat oshishi bilan taxminan quyidagi qonun bo‘yicha kamayadi:

$$\kappa \propto 1/T \quad (3)$$

Haroratga bog‘liqlikning umumiy ko‘rinishi 3-rasmda tasvirlangan. Rasmda uch xil holat — sof kristall, kam miqdorda kiritmali va kuchli legirlangan namuna uchun egri chiziqlar sifat jihatdan keltirilgan.



3-rasm. κ(T) bog‘liqligining sifat modeli (logarifmik masshtab). Hisoblash Debay issiqlik sig‘imi va Matissen qoidasi asosida bajarilgan; qiymatlar nisbiy birliklarda berilgan.

4.4. Kiritmalar va legirlashning ta’siri

Kiritmalar, vakansiyalar va izotopik tarkib o‘zgarishi fononlarni Releyga o‘xshash qonun ($\tau^{-1} \propto \omega^4$) bilan sochadi. Bu asosan maksimum atrofidagi va undan pastroq haroratlarda κ ni pasaytiradi (3-rasm). Yuqori darajada legirlangan yarimo‘tkazgichlarda esa erkin elektronlar ham issiqlik tashiydi, ya’ni $\kappa = \kappa_{ph} + \kappa_{el}$. Elektron tashkil etuvchi Videman–Frans qonuni bilan elektr o‘tkazuvchanlikka bog‘lanadi:

$$\kappa_{el} = L \cdot \sigma \cdot T \quad (4)$$

bu yerda L — Lorens soni (≈ $2{,}44 \cdot 10^{-8}$ Vt·Om/K²), σ — solishtirma elektr o‘tkazuvchanlik.

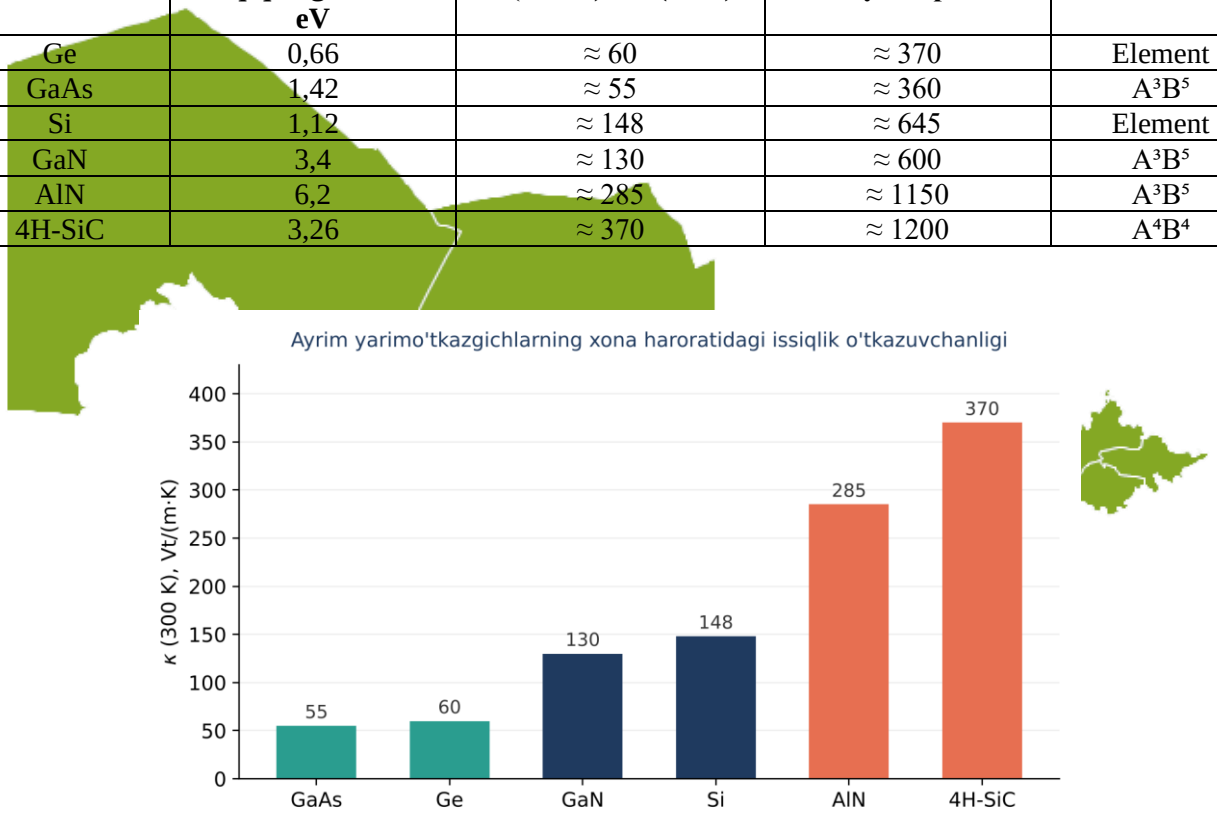
5. Turli materiallarning taqqoslanishi

Issiqlik o‘tkazuvchanlik kristall panjaraning mustahkamligi, atomlar massasi va bog’

turiga kuchli bog‘liq. Yengil atomlardan tashkil topgan, bog‘lari kuchli materiallarda (Debay harorati yuqori) fononlar tezligi katta va κ yuqori bo‘ladi. 1-jadvalda ayrim yarimo‘tkazgichlarning taxminiy xarakteristikalari keltirilgan, 4-rasmda esa ularning xona haroratidagi κ qiymatlari taqqoslangan.

1-jadval. *Ayrim yarimo‘tkazgichlarning taxminiy parametrlari (adabiyot ma’lumotlari asosida, qiymatlar namuna sifatiga qarab o‘zgaradi).*

Material	Taqiqlangan zona, eV	κ (300 K), Vt/(m·K)	Debay temp. θ, K	Turi
Ge	0,66	≈ 60	≈ 370	Element
GaAs	1,42	≈ 55	≈ 360	A^3B^5
Si	1,12	≈ 148	≈ 645	Element
GaN	3,4	≈ 130	≈ 600	A^3B^5
AlN	6,2	≈ 285	≈ 1150	A^3B^5
4H-SiC	3,26	≈ 370	≈ 1200	A^4B^4



4-rasm. Xona haroratida (300 K) ayrim yarimo‘tkazgichlarning issiqlik o‘tkazuvchanligi.

Ko‘rinib turibdiki, kremniy karbid (SiC) va alyuminiy nitrid (AlN) issiqlik o‘tkazuvchanligi bo‘yicha kremniydan ancha ustun. Shu sababli ular quvvatli elektronika va yuqori chastotali qurilmalarda issiqlikni chiqaruvchi asos sifatida qo‘llaniladi. Aksincha, germaniy va galliy arsenid nisbatan past κ ga ega.

6. Amaliy ahamiyati

• **Mikroelektronika:** yuqori κ ga ega materiallar chiplarda issiqlikni samarali tarqatishda qo‘llaniladi.

• **Termoelektrik qurilmalar:** issiqlikni elektr energiyasiga aylantirishda samaradorlik $ZT = S^2\sigma T/\kappa$ ko‘rsatkichi bilan baholanadi, shuning uchun bu yerda past panjara issiqlik o‘tkazuvchanligi talab qilinadi.

• **Quyosh energetikasi:** quyosh elementlari qizishi ularning FIK ni kamaytiradi, issiqlikni boshqarish samaradorlikni oshiradi.

• **Nanotexnologiya:** nanotuzilmalarda chegaraviy sochilish hisobiga κ ni maqsadli ravishda o‘zgartirish mumkin.

7. Xulosa

Olib borilgan tahlil quyidagi xulosalarga kelishga imkon berdi:

• yarimo‘tkazgichlarda issiqlik asosan akustik fononlar orqali uzatiladi, $\kappa = (1/3)Cvl$ formulasi uning harorat bo‘yicha o‘zgarishini tushuntirishga asos bo‘ladi;

• past haroratlarda $\kappa \propto T^3$, o‘rtacha haroratlarda maksimum kuzatiladi, yuqori haroratlarda esa Umklapp jarayonlari tufayli $\kappa \propto 1/T$ qonuniga bo‘ysunadi;

• kiritmalar va nuqsonlar fononlarni sochib issiqlik o‘tkazuvchanlikni pasaytiradi, kuchli legirlashda esa elektron hissa ham paydo bo‘ladi;

• κ qiymati materialning bog’ mustahkamligi va atom massasiga bog‘liq; SiC va AlN kabi materiallar quvvatli elektronika uchun istiqbolli.

Bu qonuniyatlarni bilish zamonaviy qurilmalarda issiqlik rejimini boshqarish va yangi termoelektrik materiallar yaratishda muhim ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Kittel Ch. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. — Wiley, 2005.

2. Ziman J. M. Electrons and Phonons. — Oxford University Press, 2001.

3. Ashcroft N. W., Mermin N. D. Solid State Physics. — Saunders College, 1976.

4. Callaway J. Model for lattice thermal conductivity at low temperatures // Physical Review. — 1959. — Vol. 113. — P. 1046–1051.

5. Slack G. A. Nonmetallic crystals with high thermal conductivity // Journal of Physics and Chemistry of Solids. — 1973. — Vol. 34. — P. 321–335.