

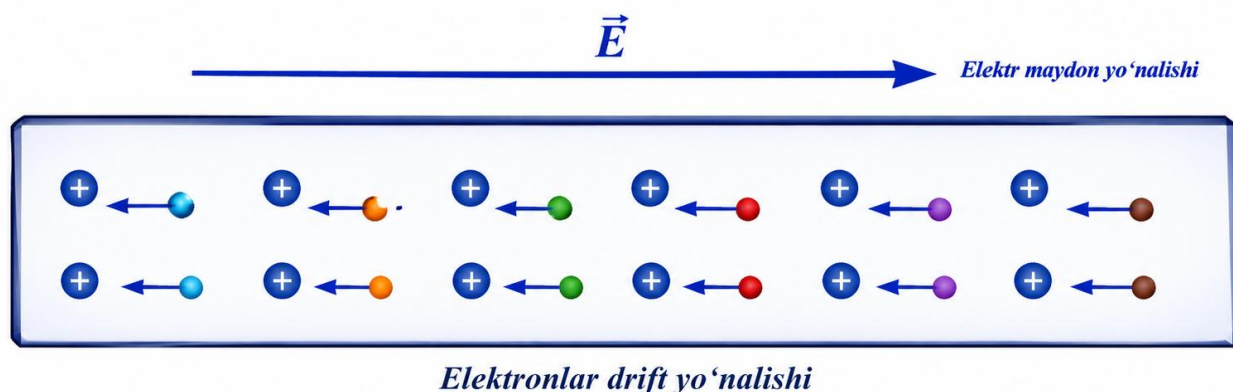
ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIKNING TABIATI. METALLARDA ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIK. RIKE, MANDELSHTAM-PAPALEKSI VA STYUART-TOLMEN TAJRIBALARI

Metallarda elektr o‘tkazuvchanlik erkin yoki kollektivlashgan elektronlarning tashqi elektr maydon ta‘sirida yo‘nalgan harakati bilan bog‘liq. Klassik elektron nazariya metall kristall panjarasini musbat ionlar tizimi, o‘tkazuvchanlik elektronlarini esa nisbatan erkin zaryad tashuvchilar sifatida qaraydi. Elektr maydon bo‘lmaganda elektronlarning issiqlik harakati tartibsiz bo‘lib, o‘rtacha tok nolga teng; maydon qo‘yilganda esa tartibsiz harakat ustiga kichik drift tezligi qo‘shiladi. Metall tok tashuvchilarining tabiati tarixan Rike, Mandelshtam-Papaleksi hamda Styuart-Tolmen tajribalari orqali muhim eksperimental dalillar bilan aniqlangan.

Darsning maqsadi

Metallarda elektr tokini tashuvchi zarrachalarning fizik tabiatini, klassik elektron o‘tkazuvchanlik modelini, drift tezligi va o‘tkazuvchanlik formulasini tushuntirish; tarixiy tajribalarning g‘oyasi, bajarilish jarayoni va ilmiy xulosalarini tahlil qilish; tajriba natijalarini zamonaviy elektron nazariya bilan bog‘lash.

Metallarda elektr o‘tkazuvchanlikning elektron modeli



Nazariy asos:

Metallarda elektr o‘tkazuvchanlik erkin elektronlar (valent elektronlar)ning metall panjarasi bo‘ylab erkin harakati natijasida sodir bo‘ladi. Tashqi elektr maydon ta‘sirida elektronlar $\leftarrow \vec{E}$ ga qarama-qarshi yo‘nalishda harakatlanadi.

Asosiy tushunchalar:

- $\oplus$ — metall ionlari (panjara tugunlarida joylashgan).
- $\bullet$ — erkin elektronlar.
- $\vec{E}$ — tashqi elektr maydon yo‘nalishi.
- Elektronlarning drift yo‘nalishi $\leftarrow \vec{E}$ ga qarama-qarshi.

1-rasm. Metall o‘tkazgichda elektr maydon va elektronlarning drift harakati

Elektronlarning zaryadi manfiy bo‘lgani sababli ularning drift yo‘nalishi E vektoriga qarama-qarshi, shartli tok yo‘nalishi esa E bilan bir yo‘nalishda.

1. Metallarda elektr o‘tkazuvchanlikning mikroskopik mazmuni

Metall atomlarining tashqi valent elektronlari kristall hosil bo‘lganda alohida atomga qat‘iy bog‘lanib qolmay, butun kristall bo‘ylab delokalizatsiyalangan elektron holatlarini

hosil qiladi. Klassik Drude modelida bu elektronlar gazga o'xshash zaryad tashuvchilar sifatida tasvirlanadi. Elektr maydon ta'sirida elektronga $\vec{F} = -e\vec{E}$ kuch ta'sir qiladi.

$$\vec{F} = -e\vec{E}$$

To'qnashuvlar orasidagi o'rtacha vaqt τ bo'lsa, klassik modelda elektronning o'rtacha drift tezligi moduli:

$$v_d = eE\tau/m$$

Tok zichligi n ta elektron konsentratsiyasi uchun:

$$\vec{j} = nev_d$$

Natijada:

$$\vec{j} = (ne^2\tau/m)\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

$$\sigma = ne^2\tau/m$$

Bu klassik Drude o'tkazuvchanlik formulasidir. Zamonaviy qattiq jism fizikasida m o'rnida samarali massa, τ esa kvant sochilish mexanizmlari bilan aniqlanadi.

Kattalik	Belgi	Birlik	Mazmun
Elektron konsentratsiyasi	n	m^{-3}	Birlik hajmdagi tashuvchilar
Drift tezligi	v_d	m/s	Yo'nalgan o'rtacha tezlik
Relaksatsiya vaqti	τ	s	Sochilishlar orasidagi xarakterli vaqt
O'tkazuvchanlik	σ	S/m	j va E proporsionallik koeffitsienti

2. Tok kuchi, drift tezligi va qarshilik

Kesim yuzi S bo'lgan simdan tok o'tganda tok kuchi elektronlar konsentratsiyasi va drift tezligi bilan quyidagicha bog'lanadi:

$$I = neSv_d$$

Bu formula metallarda katta tok kuchi elektronlarning juda katta drift tezligini talab qilmasligini ko'rsatadi, chunki n juda katta — odatda $10^{28} m^{-3}$ tartibida.

1-misol

$n=8.5 \times 10^{28} m^{-3}$, $S=1 mm^2$ va $I=2 A$ bo'lgan mis sim uchun $v_d = I/(neS) \approx 1.47 \times 10^{-4} m/s$. Elektronlarning tartibsiz mikroskopik tezliklari bundan juda katta, ammo ularning yo'nalishlari tasodifiy bo'lgani uchun tokni aynan kichik drift komponenti hosil qiladi.

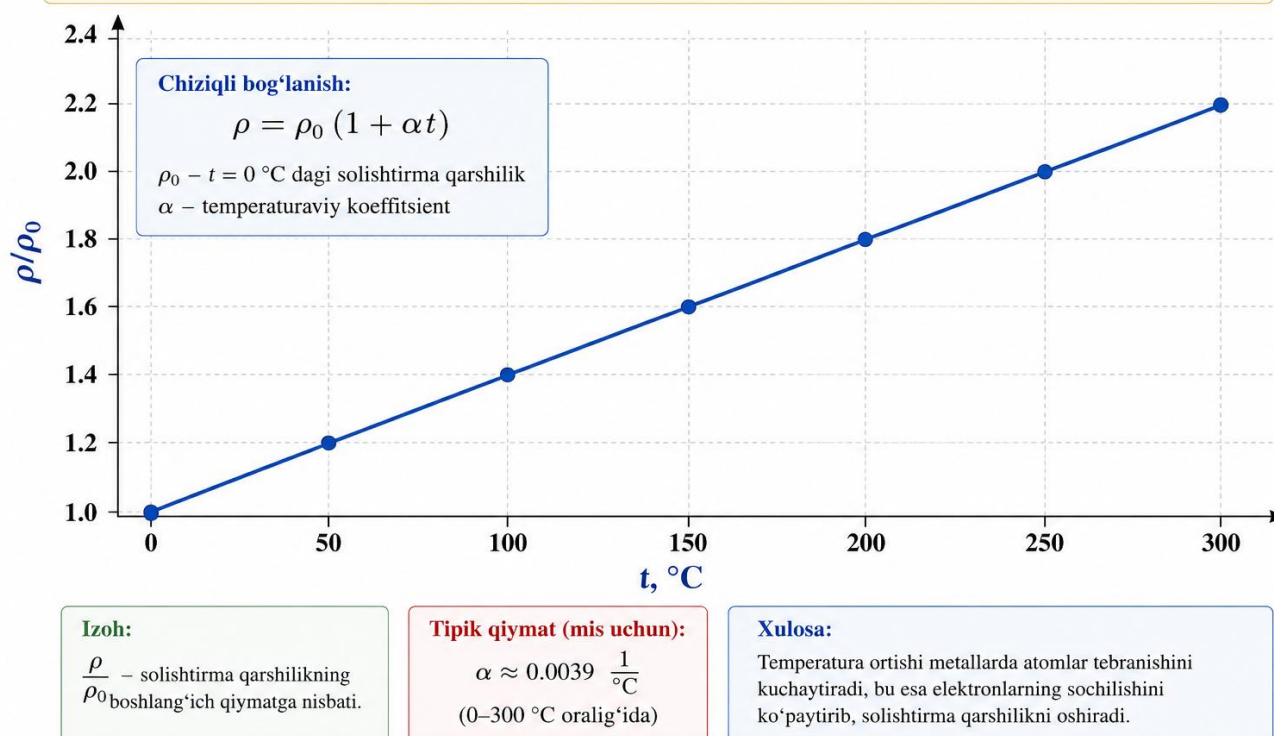
O'tkazgichning makroskopik qarshiligi:

$$R = \rho l/S, \quad \rho = 1/\sigma$$

Klassik modeldan $\rho = m/(ne^2\tau)$. Temperatura ortganda panjara tebranishlari kuchayib, elektronlarning sochilishi ko'payadi va τ kamayadi. Shu sababli oddiy metallarda ρ ortadi.

Metall solishtirma qarshiligining temperaturaga bogʻliqligi

Metallar uchun solishtirma qarshilik temperatura ortishi bilan taxminan chiziqli ravishda ortadi.



2-rasm. Metall solishtirma qarshiligining temperatura bilan taxminan chiziqli ortishi

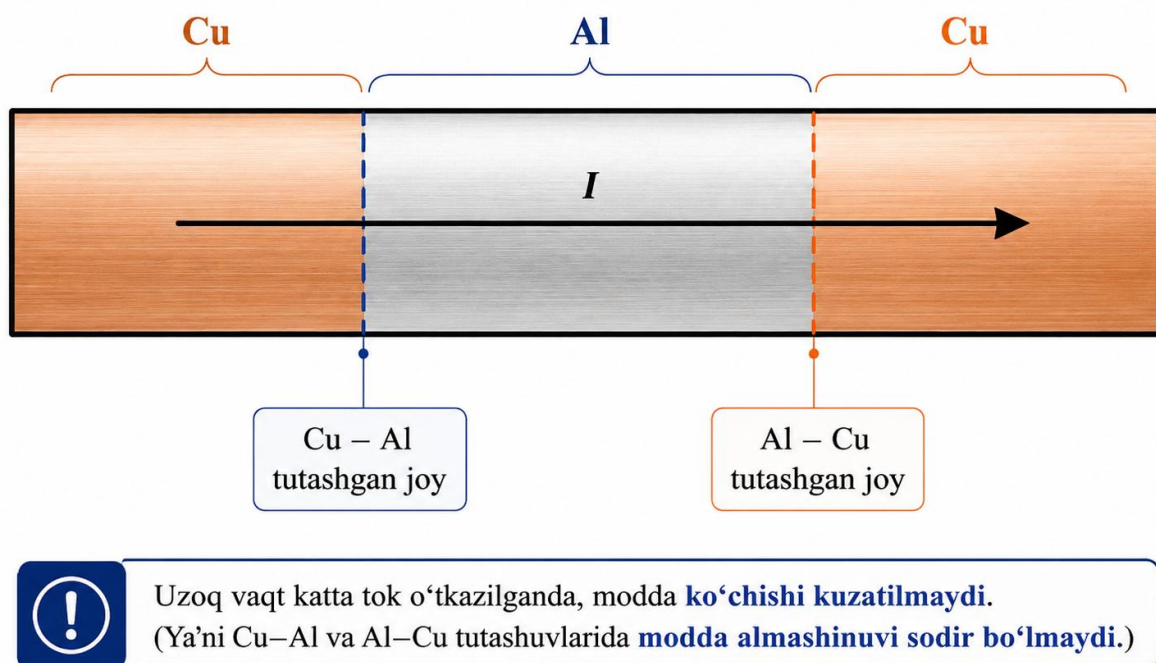
2-misol

20 °C da $R_0=10 \Omega$, $\alpha=0.004 \text{ K}^{-1}$ boʻlsa 120 °C da $R=R_0[1+\alpha(120-20)]=14 \Omega$.

3. Rike tajribasi: tok tashuvchilar modda atomlari emas

Rike tajribasining asosiy maqsadi metall orqali uzoq vaqt katta elektr zaryadi oʻtkazilganda moddaning sezilarli koʻchishi sodir boʻladimi, degan savolni tekshirish edi. Turli metallardan, jumladan mis va alyuminiydan tayyorlangan silindrsimon qismlar bir-biriga zich tutashtirilib, ulardan uzoq vaqt davomida katta tok oʻtkazilgan. Tajriba oldidan va keyin tutashuv sohalarining massasi va tarkibi tekshirilgan.

RIKE TAJRIBASINING SXEMATIK MAZMUNI



3-rasm. Rike tajribasining soddalashtirilgan sxemasi

Agar tok metall ionlarining makroskopik ko'chishi hisobiga yuzaga kelganida, kontakt chegaralarida modda almashinuvi yoki massa o'zgarishi sezilishi kerak edi. Bunday sezilarli modda tashilishi kuzatilmagani metallardagi tok kristall panjara atomlarining ko'chishi emasligini ko'rsatdi.

Tajribaning ilmiy xulosasi

Rike tajribasi metallardagi o'tkazuvchanlik tashuvchilari moddaning musbat ionlari emasligi haqidagi muhim dalil bo'ldi. Biroq tajribaning o'zi tashuvchining zaryad ishorasi va q/m nisbatini bevosita aniqlamaydi; bu masalani keyingi inertsia tajribalari aniqlashtirdi.

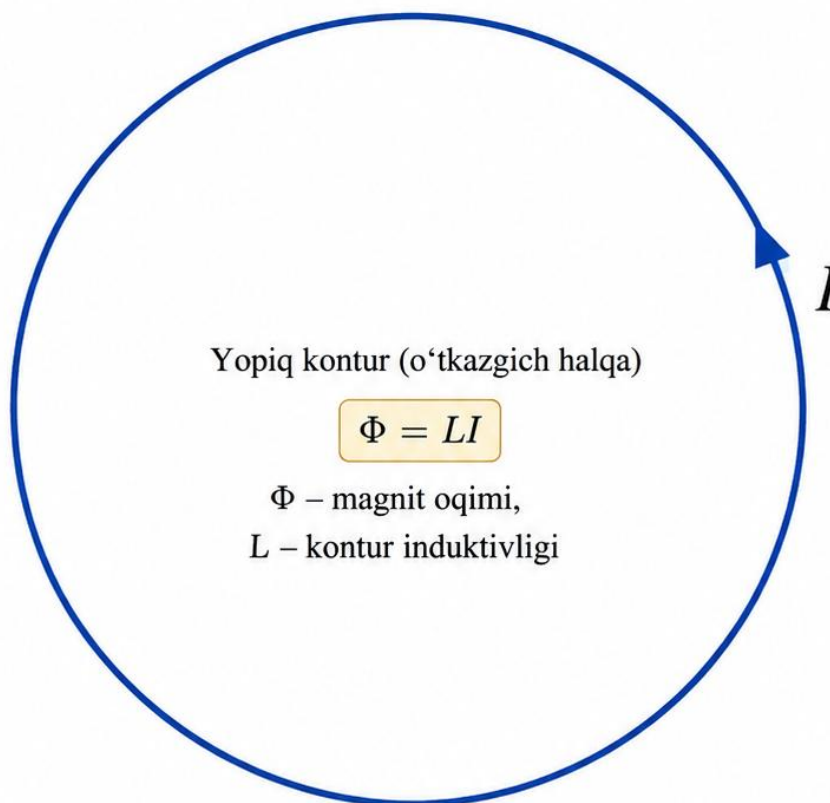
Tajriba elementi	Kuzatilgan holat	Xulosa
Turli metall kontaktlari	Uzoq tok o'tkazildi	Tok mavjud
Kontakt tarkibi	Sezilarli modda ko'chishi yo'q	Ionlar asosiy tashuvchi emas
Elektr zaryadi	Katta miqdorda o'tdi	Harakatchan elektron modeliga mos

4. Mandelshtam-Papaleksi tajribasi: elektronlar inertsia xossasi

L. I. Mandelshtam va N. D. Papaleksi metallardagi zaryad tashuvchilarning inertsia xossasini tekshirish g'oyasini amalga oshirdilar. Metall simli g'altak tez aylantirilganda yoki mexanik harakati keskin o'zgartirilganda kristall panjara ionlari mexanik jism bilan birga harakatini o'zgartiradi, erkin elektronlar esa inertsia sababli juda qisqa vaqt avvalgi harakat holatini saqlashga intiladi.

Mandelshtam–Papaleksi tajribasi: o‘z-o‘zini induksiya hodisasi

Konturdagi tokning o‘zgarishi o‘z magnit oqimini o‘zgartiradi va konturda EYuK hosil bo‘ladi, bu esa tokning o‘zgarishiga qarshi turadi.



Induksiya tufayli qisqa tok impuls

O‘z-o‘zini induksiya EYuK:

$$\varepsilon_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt}$$

ε_{ind} – o‘z-o‘zini induksiya EYuK (V)

L – kontur induktivligi (H)

$\frac{dI}{dt}$ – tokning vaqt bo‘yicha o‘zgarish tezligi (A/s)

Fizik mazmuni:

Tok ortganda konturda hosil bo‘lgan induksiya EYuK boshlang‘ich ortishiga qarshi yo‘nalgan bo‘ladi; tok kamayganda esa shu kamayishga qarshi yo‘nalgan bo‘ladi.

4-rasm. Mandelshtam-Papaleksi tajribasining fizik g‘oyasi

Elektronlar bilan panjara orasidagi nisbiy siljish qisqa muddatli zaryad ajralishi va elektr tok impulsini yuzaga keltiradi. Galvanometr yoki telefon kabi sezgir qurilma ushbu impulsni qayd etishi mumkin.

$$F_{\text{in}} = -ma$$

Inertsia kuchining zaryadga nisbati ekvivalent elektr maydon sifatida qaralishi mumkin. Soddalashtirilgan modelda:

$$E_{in} \approx ma/e$$

3-misol

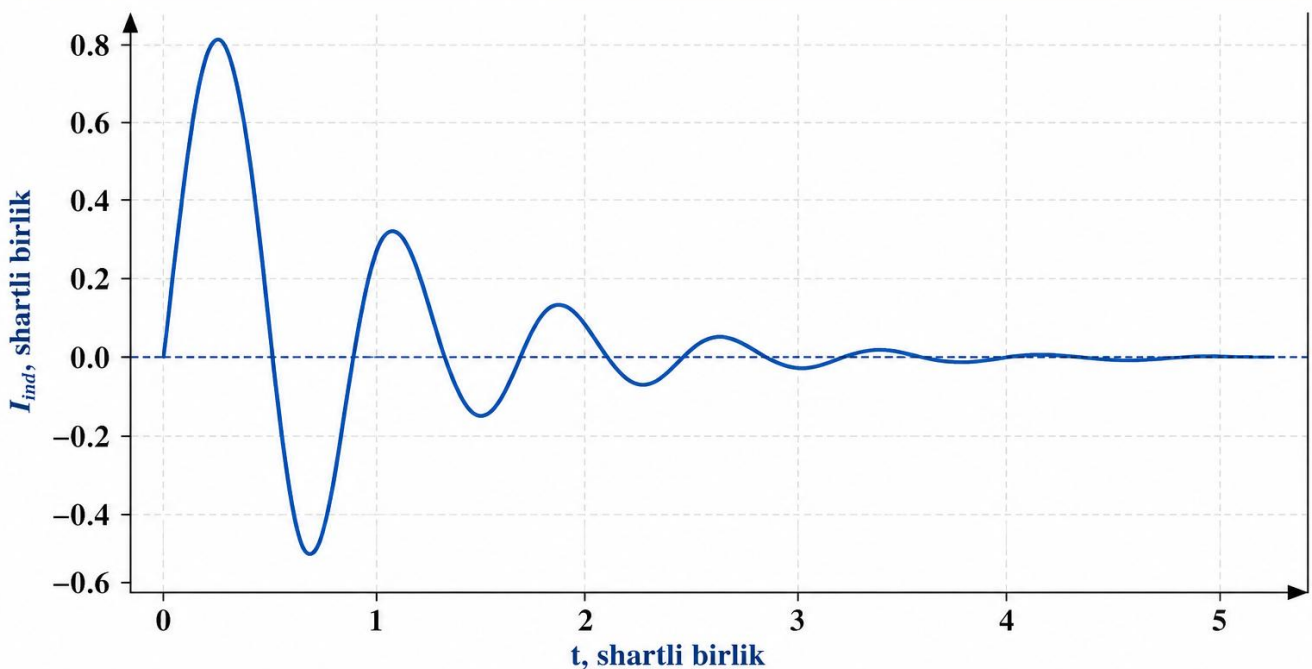
Agar metallning mexanik tezlanishi $a=100 \text{ m/s}^2$ deb olinsa, elektron uchun ekvivalent inertsia maydoni $E_{in} \approx m_e a/e \approx 5.7 \times 10^{-10} \text{ V/m}$. Qiymat juda kichik bo'lgani sababli tajriba sezgir o'lchash usullarini talab qiladi.

Tajriba metallardagi harakatchan zaryad tashuvchilar massa va inertsia xossasiga ega ekanini ko'rsatgan tarixiy tajribalardan biridir.

5. Styuart-Tolmen tajribasi va zaryad tashuvchining ishorasi

T. D. Styuart va R. C. Tolmen inertsia tajribalarini yanada miqdoriy shaklda rivojlantirdilar. Metall g'altak yoki o'tkazgich tez aylantirilib, so'ng keskin tormozlanganda kristall panjara tezligi tez o'zgaradi. Erkin zaryad tashuvchilar inertsia tufayli panjaraga nisbatan siljiydi va qisqa muddatli tok hosil qiladi.

Styuart–Tolmen tajribasida inertsia toki impulsining tipik ko'rinishi



Izoh: Inertsia toki impulsining amplitudasi vaqt o'tishi bilan eksponentsial qonun bo'yicha kamayadi (kontur qarshiligi mavjudligi sababli).

5-rasm. Tormozlanishdan keyingi inertsia tok impulsining sxematik grafigi

Tok impulsining yo'nalishi zaryad tashuvchilar manfiy zaryadli ekanini ko'rsatadi. Tajribada induksion zaryad va mexanik harakat parametrlari orasidagi bog'lanishdan zaryadning massaga nisbati q/m ni baholash mumkin bo'lgan.

$$|q|/m \approx e/m_e$$

Elektron uchun zamonaviy qiymat $e/m_e \approx 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$. Tarixiy inertsia tajribalari metall o'tkazuvchanligida elektronlar asosiy zaryad tashuvchilar ekanini eksperimental jihatdan mustahkamladi.

4-misol

Agar tajriba natijasidan $|q|/m=1.7 \times 10^{11}$ C/kg tartibidagi qiymat olinsa, u elektronning e/m nisbatiga yaqin bo'lib, tashuvchining elektron tabiatini ko'rsatadi.

6. Uch tajribaning o'zaro ilmiy bog'liqligi

Tajriba	Asosiy g'oya	Aniqlangan muhim xulosa
Rike	Tok o'tganda modda ko'chishini tekshirish	Metall ionlari makroskopik tok tashuvchi emas
Mandelshtam-Papaleksi	Mexanik harakat o'zgarganda inertsia toki	Harakatchan zaryad tashuvchilar inertsia va massaga ega
Styuart-Tolmen	Tormozlanishdagi tokni miqdoriy o'lchash	Tashuvchilar manfiy; q/m elektron qiymatiga yaqin

Bu tajribalar bir-birini to'ldiradi. Rike tajribasi tokni metallning modda ko'chishi bilan izohlashni rad etishga yordam berdi. Mandelshtam-Papaleksi tajribasi harakatchan zaryad tashuvchilarning mexanik inertsia xossasini namoyish etdi. Styuart-Tolmen tajribasi esa inertsia tokini miqdoriy tahlil qilib, tashuvchilarning manfiy zaryadli elektronlar ekanini ko'rsatdi.

Klassik elektron nazariya bilan bog'lanish

Drude modelida elektronlar elektr maydonda tezlanadi, so'ng panjara, nuqsonlar va boshqa elektronlar bilan sochilishlar tufayli yo'nalgan impulsini qisman yo'qotadi. Statsionar drift tezligi doimiy bo'lib, $j=\sigma E$ qonuni kelib chiqadi. Tarixiy tajribalar aynan erkin elektronlarning mavjudligi va inertsia xossasiga tajribaviy asos berdi.

$$\sigma = ne^2\tau/m$$

Formuladan metall o'tkazuvchanligi tashuvchilar konsentratsiyasi n , ularning zaryadi e , massasi m va relaksatsiya vaqti τ ga bog'liq ekanini ko'rish mumkin.

7. Klassik nazariyaning yutuqlari va chegaralari

Klassik elektron nazariya Om qonunining mikroskopik mazmunini, Joule-Lenz issiqlik ajralishini, elektr va issiqlik o'tkazuvchanlik orasidagi bog'lanishning umumiy sabablarini tushuntirishda muhim tarixiy rol o'ynadi. Biroq u metallarning elektron issiqlik sig'imi, ayrim transport koeffitsientlarining temperatura bog'lanishi va Hall koeffitsientining barcha materiallardagi ishorasini to'liq tushuntira olmaydi.

Zamonaviy kvant nazariyasida elektronlar Fermi-Dirak statistikasiga bo'ysunadi va kristallning davriy potensialida energetik zonalar hosil qiladi. Elektr o'tkazuvchanlikda asosan Fermi sathi yaqinidagi elektron holatlari qatnashadi.

Model	Kuchli tomoni	Chegarasi
Drude klassik modeli	$j=\sigma E$, drift va sochilishni sodda tushuntiradi	Kvant statistikasini hisobga olmaydi
Sommerfeld modeli	Fermi-Dirak statistikasini qo'shadi	Kristall zonalarini to'liq bermaydi

Zona nazariyasi	Metall, yarimo'tkazgich, dielektrikni yagona asosda izohlaydi	Matematik jihatdan murakkabroq
-----------------	---	--------------------------------

5-misol: relaksatsiya vaqtini baholash

Mis uchun $\sigma \approx 5.8 \times 10^7$ S/m, $n \approx 8.5 \times 10^{28}$ m⁻³ deb olsak, Drude formulasidan $\tau = m\sigma / (ne^2) \approx 2.4 \times 10^{-14}$ s tartibida chiqadi. Bu elektronlarning sochilishlari juda tez sodir bo'lishini ko'rsatadi.

8. Darsda tajribalarni tushuntirish algoritmi

Bosqich	Metodik amal
1	Muammo qo'yish: metall tokini qaysi zarracha tashiydi?
2	Rike tajribasini ko'rsatish: katta zaryad o'tadi, modda ko'chishi yo'q.
3	Inertsia g'oyasini kiritish: erkin tashuvchi panjaradan nisbatan mustaqil.
4	Mandelshtam-Papaleksi tajribasida mexanik harakat o'zgarishidan tok impulsi hosil bo'lishini tushuntirish.
5	Styuart-Tolmen tajribasida impuls yo'nalishi va q/m ning fizik ma'nosini tahlil qilish.
6	Natijalarni elektron nazariya: $I = neSv_d$ va $\sigma = ne^2\tau/m$ bilan bog'lash.
7	Klassik modelning chegaralarini kvant zona nazariyasiga o'tish bilan ko'rsatish.

6-misol: tok va tashuvchilar soni

$I = 1$ A tok 1 s davomida oqsa, kesimdan $q = It = 1$ C zaryad o'tadi. Elektronlar soni $N = q/e \approx 6.24 \times 10^{18}$ ta. Bu juda katta son bo'lib, metallarda tokning kollektiv elektron jarayoni ekanini ko'rsatadi.

Muammoli savollar

Rike tajribasi nima sababdan ionli o'tkazuvchanlik modeliga qarshi dalil bo'lgan? Mandelshtam-Papaleksi tajribasida mexanik tezlanish nega elektr signal hosil qiladi? Styuart-Tolmen tajribasida tok yo'nalishi tashuvchi zaryad ishorasini qanday ko'rsatadi? Elektronlarning drift tezligi juda kichik bo'lsa ham nega tok kuchi katta bo'lishi mumkin? Klassik Drude modeli qaysi hodisalarni to'liq tushuntira olmaydi?

Ko'p uchraydigan xatolar

Elektronlarning drift tezligini ularning issiqlik yoki Fermi tezligi bilan tenglashtirish; shartli tok yo'nalishini elektronlar harakati bilan bir xil deb olish; Rike tajribasi elektron zaryadini bevosita o'lchagan deb talqin qilish; inertsia tajribalarini elektromagnit

induksiya bilan aynan bir hodisa deb hisoblash; klassik formulalarni zamonaviy zona nazariyasining to'liq o'rnini bosadi deb qarash.

9. Asosiy formulalar, mustahkamlash va xulosa

Formula	Mazmuni
$F = -eE$	Elektronga elektr maydon kuchi
$v_d = eE\tau/m$	Drude modelidagi drift tezligi moduli
$I = neSv_d$	Metall tok kuchining mikroskopik ifodasi
$j = nev_d$	Tok zichligi
$j = \sigma E$	Om qonunining differensial ko'rinishi
$\sigma = ne^2\tau/m$	Drude o'tkazuvchanligi
$\rho = 1/\sigma$	Solishtirma qarshilik
$R = \rho l/S$	Sim qarshiligi
$e/m_e \approx 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$	Elektronning zaryad-massa nisbati

Mustaqil topshiriqlar

1. $n = 9 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$, $S = 0.8 \text{ mm}^2$, $I = 1.5 \text{ A}$ uchun elektronlarning drift tezligini toping.
2. $\sigma = 6 \times 10^7 \text{ S/m}$ va $E = 0.01 \text{ V/m}$ bo'lsa j ni hisoblang.
3. $n = 8 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$, $\sigma = 5 \times 10^7 \text{ S/m}$ uchun Drude modeli asosida τ ni baholang.
4. 2 A tok 10 minut davomida o'tsa, kesimdan o'tgan elektronlar sonini toping.
5. Rike tajribasining maqsadi va asosiy xulosasini 4-5 gap bilan izohlang.
6. Mandelshtam-Papaleksi va Styuart-Tolmen tajribalarining o'xshash va farqli tomonlarini jadval shaklida tahlil qiling.

Xulosa

Metallarda elektr o'tkazuvchanlikning asosiy tashuvchilari elektronlardir. Elektr maydon ularning tartibsiz mikroskopik harakatiga yo'nalgan drift komponentini qo'shadi va $I = neSv_d$ hamda $j = \sigma E$ qonuniyatlari yuzaga keladi. Rike tajribasi tok o'tishi metall ionlarining sezilarli modda ko'chishi bilan bog'liq emasligini ko'rsatdi. Mandelshtam-Papaleksi tajribasi erkin zaryad tashuvchilarning inertsia xossasini namoyon qildi, Styuart-Tolmen tajribasi esa inertsia tokini miqdoriy tahlil qilib, metallardagi asosiy tashuvchilarning manfiy zaryadli elektronlar ekanini va ularning q/m nisbati elektron qiymatiga mosligini tasdiqladi. Klassik elektron nazariya bu natijalarni sodda fizik modelda birlashtiradi, zamonaviy kvant va zona nazariyasi esa metall o'tkazuvchanligining chuqurroq mikroskopik tavsifini beradi.

Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.
2. Young H. D., Freedman R. A. University Physics with Modern Physics. Pearson.
3. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Wiley.
4. Ashcroft N. W., Mermin N. D. Solid State Physics. Cengage.