

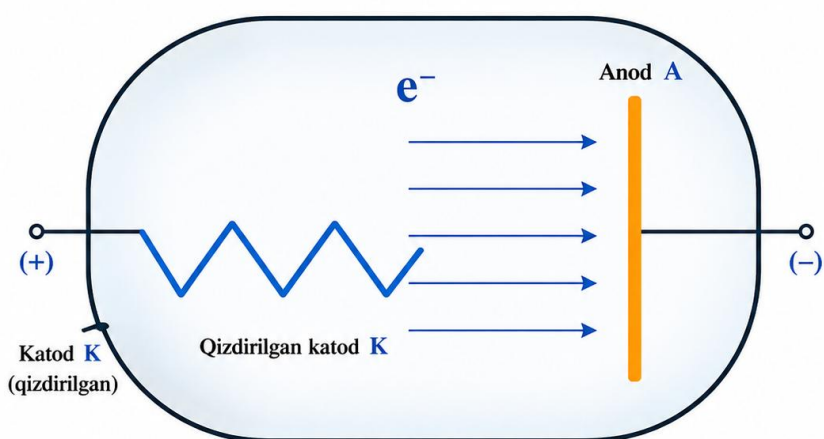
VAKUUMDA ELEKTR TOKI. TERMOELEKTRON EMISSIYA, VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASI VA TO'YINISH TOKINING TEMPERATURAGA BOG'LIQLIGI

Vakuumda elektr toki gaz yoki metall ichidagi o'tkazuvchanlikdan tubdan farq qiladi: yetarlicha yuqori vakuumda erkin zaryad tashuvchilar o'z-o'zidan deyarli mavjud emas. Tok hosil qilish uchun elektrod sirtidan elektronlarni vakuumga chiqarish va ularni tashqi elektr maydon yordamida yo'naltirish zarur. Qizdirilgan metall katoddan elektronlarning ajralib chiqishi termoelektron emissiya deyiladi. Ushbu hodisa vakuum diodlari, elektron lampalar, elektron mikroskoplar, rentgen trubkalari va ko'plab elektron-optik qurilmalarning fizik asoslaridan biridir.

Darsning maqsadi

Vakuumda tok hosil bo'lish shartlarini, termoelektron emissiyaning mikroskopik mexanizmini, chiqish ishining rolini, vakuum diodning volt-amper xarakteristikasini, fazoviy zaryad va to'yinish rejimlarini hamda Richardson-Dushman qonuni orqali to'yinish tokining temperaturaga bog'liqligini ilmiy asosda tushuntirish.

Vakuum lampada termoelektron emissiya va elektronlar oqimi



Qizdirilgan katod **K** – qizdirilganda termoelektron emissiya natijasida elektronlar chiqishi.



e^- Emissiya qilingan elektronlarning anod tomonga yo'nalgan oqimi.



Anod **A** – elektronlar yig'iladigan musbat elektrod.



Vakuum – elektronlar to'qnashuvsiz erkin harakatlanadi.



Asosiy jarayon:

Katod **K** qizdirilganda uning sirtidan elektronlar termoelektron emissiya orqali chiqadi va vakuumda to'qnashuvsiz harakatlanib, anod **A** ga yetib boradi. Natijada elektronlar oqimi hosil bo'ladi.

1-rasm. Qizdirilgan katoddan chiqqan elektronlarning anod tomon harakati

Asosiy tushuncha	Mazmuni
Vakuum toki	Vakuumda yo'nalgan elektronlar oqimi
Termoemissiya	Qizdirish hisobiga elektronlarning sirtini tark etishi
Chiqish ishi	Elektronni metall sirtidan chiqarish uchun zarur minimal energiya
To'yinish toki	Katod chiqargan elektronlarning deyarli barchasi anodga yetadigan maksimal tok

1. Vakuumda elektr tokining hosil bo'lishi

Vakuum - bosimi atmosfera bosimidan juda kichik bo'lgan muhit. Yuqori vakuumda molekulalar konsentratsiyasi kamaygani sababli elektronlarning gaz molekulalari bilan to'qnashuvlari kam bo'ladi. Biroq tok paydo bo'lishi uchun ikki shart zarur: erkin zaryad tashuvchilar manbai va ularni yo'naltiruvchi elektr maydon.

Ikki elektrodli vakuum asbobida qizdiriladigan katod K elektronlar manbai vazifasini bajaradi. Anod A katodga nisbatan musbat potensialga ega bo'lsa, elektronlarga anod tomon yo'nalgan kuch ta'sir qiladi.

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

Elektron manfiy zaryadli bo'lgani sababli uning kuch yo'nalishi elektr maydon $\mathbf{E}$ vektoriga qarama-qarshi. Anod katodga nisbatan musbat bo'lganda maydon yo'nalishi anoddan katodga, elektron harakati esa katoddan anodga bo'ladi.

Agar anod katodga nisbatan manfiy bo'lsa, ko'pchilik termoelektronlar katod yaqiniga qaytariladi va anod toki juda kichik bo'ladi. Shu sababli oddiy vakuum diod bir tomonlama o'tkazuvchanlik xususiyatiga ega.

1-misol

Elektron $U=100$ V potentsiallar farqida katoddan anodga tezlashtirilsa, maydon bajargan ish eU ga teng. Elektron olgan kinetik energiya $W_k=eU=100$ eV. Joullarda $W_k=1.60 \times 10^{-17}$ J.

$$eU = m v^2 / 2$$

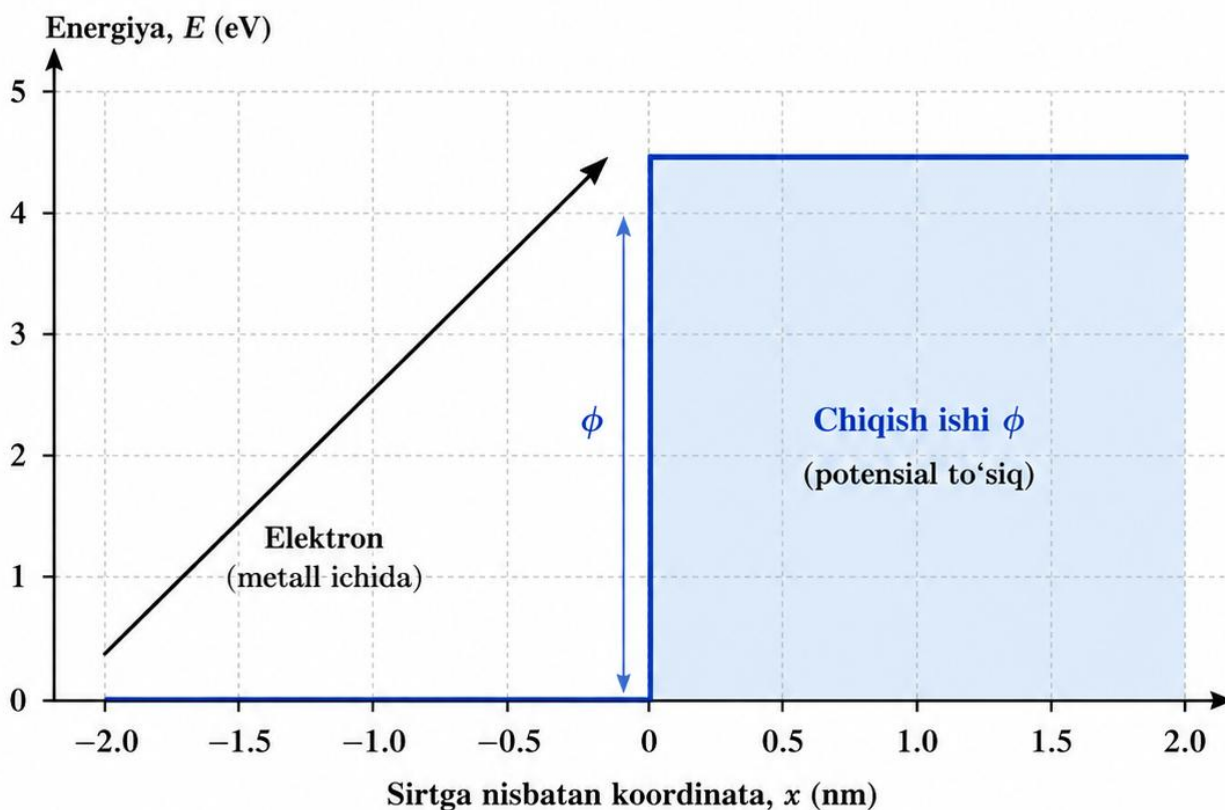
Norelyativistik yaqinlashishda elektron tezligi $v=\sqrt{2eU/m}$ bo'lib, 100 V uchun taxminan 5.9×10^6 m/s.

2. Termoelektron emissiyaning fizik mohiyati

Metall ichidagi elektronlar turli energiyali kvant holatlarda joylashadi. Sirt chegarasida elektronni metall ichida ushlab turuvchi potensial to'siq mavjud. Elektron vakuumga chiqishi uchun ushbu energetik to'siqni yengishi kerak. Metall sirtidan elektronni vakuumga olib chiqish uchun zarur minimal energiya chiqish ishi deb ataladi va odatda ϕ bilan belgilanadi.

Metall sirtidan elektron chiqishining energetik modeli

Elektron metall ichidan sirtga kelganda potensial to'siq ϕ (chiqish ishi) ni yengib o'tadi.
Elektronning sirt tashqarisidagi kinetik energiyasi: $E_k = E - \phi$



- $x < 0$ (metall ichida): elektronlarning energiyasi E (Fermi darajasigacha) turli qiymatlarga ega.
- $x = 0$ da sirt chegarasi: potensial keskin ϕ ga ko'tariladi.
- $x > 0$ (vakuum tomonda): elektron chiqishi uchun $E \geq \phi$ bo'lishi kerak.
- Agar $E > \phi$ bo'lsa, elektron sirtni yengib o'tib, vakuumga chiqadi.



Asosiy xulosa:

Metall sirtidan elektron chiqishi uchun uning energiyasi chiqish ishidan katta yoki unga teng bo'lishi zarur:

$$E \geq \phi$$

Bu yerda ϕ – metallning chiqish ishi (eV), elektronning sirtni tark etishi uchun minimal energiya.

2-rasm. Metall sirtidagi chiqish ishi va elektronning vakuumga chiqishi

Katod qizdirilganda elektronlarning energetik taqsimoti o'zgaradi: yuqori energiyali elektronlar soni keskin ortadi. Ularning bir qismi sirt potensial to'sig'ini yengib, vakuumga chiqadi. Temperaturaning ozgina ortishi ham emissiya tokini bir necha marta yoki ko'p tartibga oshirishi mumkin.

$$W \geq \phi$$

Chiqish ishi materialning tabiatiga va sirt holatiga bog'liq. Amaliy termoemission katodlarda chiqish ishini kamaytiruvchi maxsus qoplamalar qo'llanadi.

Katod turi	Xususiyati	Amaliy ahamiyati
Sof metall	Chiqish ishi nisbatan katta	Yuqori temperatura talab qilishi mumkin
Oksidli katod	Effektiv chiqish ishi kichikroq	Past temperaturada katta emissiya
Aktivlangan katod	Sirt xossalari boshqariladi	Elektron lampalar va manbalarda samarali

2-misol

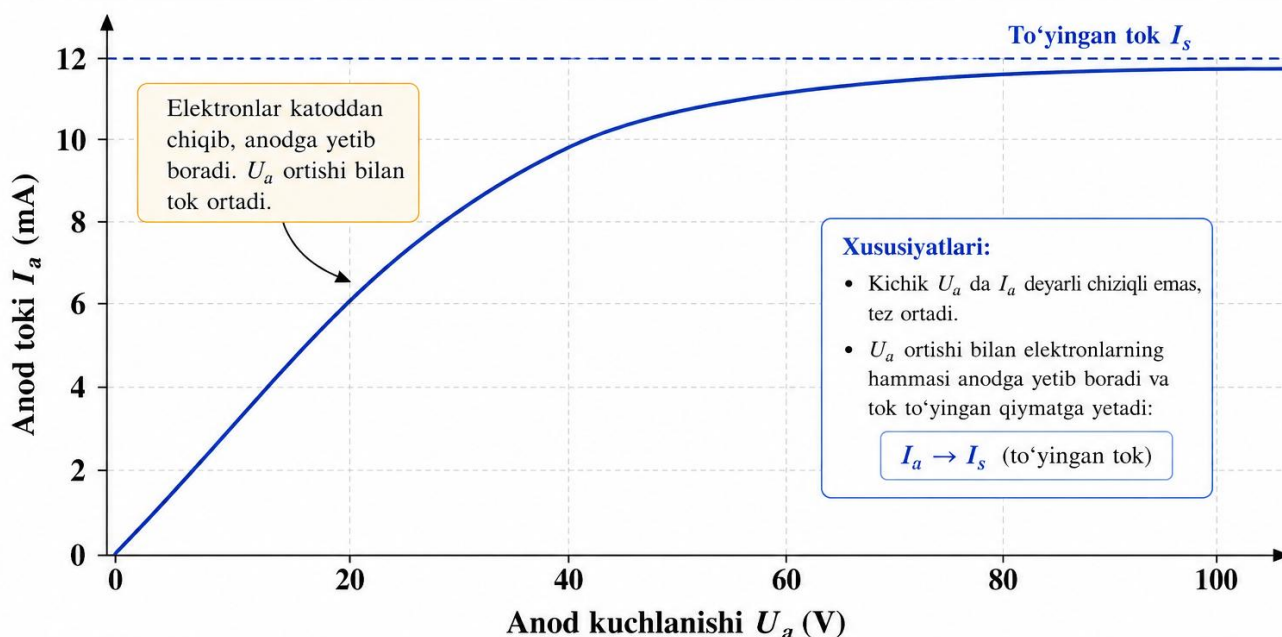
Elektronning chiqish ishi $\phi=4.5$ eV bo'lsa, uni sirt to'sig'idan o'tkazish uchun kamida 4.5 eV energiya talab qilinadi. Joullarda bu $4.5 \times 1.602 \times 10^{-19} \approx 7.21 \times 10^{-19}$ J.

3. Vakuum diodning volt-ampér xarakteristikasi

Vakuum diodda anod toki I_a ning anod kuchlanishi U_a ga bog'liqligi volt-ampér xarakteristika deyiladi. Katod temperaturasi o'zgarmas saqlanganda anod kuchlanishi kichik musbat qiymatlardan oshirilsa, anod toki dastlab tez ortadi. Bunda katod atrofida hosil bo'lgan manfiy fazoviy zaryad elektronlarning keyingi chiqishiga va anodga o'tishiga to'sqinlik qiladi.

Vakuum diodning volt-ampér xarakteristikasi

Vakuum diodda anod toki anod kuchlanishi ortishi bilan avval tez ortadi, so'ngra to'yingan qiymatga yaqinlashadi.



Izoh: Katta anod kuchlanishlarda metall sirtidan emissiya qilinayotgan elektronlarning barchasi anodga yetib boradi. Shu sababli anod toki U_a dan mustaqil bo'lib qoladi va doimiy qiymat I_s ga teng bo'ladi.

3-rasm. Vakuum diodning tipik volt-ampér xarakteristikasi

Kuchlanish ortishi bilan anodning tortuvchi elektr maydoni kuchayadi, fazoviy zaryad ta'siri kamayadi va ko'proq elektron anodga yetib boradi. Yetarlicha katta anod kuchlanishida katoddan birlik vaqtda chiqayotgan elektronlarning deyarli barchasi anodga yig'iladi. Shundan keyin kuchlanishni oshirish tokni sezilarli oshirmaydi. Bu rejim to'yinish, mos tok esa to'yinish toki deyiladi.

$I_a \rightarrow I_s$ (katod temperaturasi o'zgarmas)

Volt-ampér xarakteristikaning shakli katod temperaturasi, elektrodlar geometriyasi, sirt holati va vakuum darajasiga bog'liq.

3-misol

Katod bir sekundda 7.5×10^{16} ta elektron chiqarayotgan va ularning barchasi anodga yetayotgan bo'lsa, to'yinish toki $I_s = Ne \approx 7.5 \times 10^{16} \times 1.602 \times 10^{-19} \approx 0.012 \text{ A} = 12 \text{ mA}$.

4. Fazoviy zaryad va Child-Langmuir qonuni

Katoddan chiqqan elektronlar darhol anodga yetib bormaydi. Ular katod yaqinidagi vakuum hajmida manfiy fazoviy zaryad bulutini hosil qiladi. Ushbu bulut katoddan yangi elektronlarning uzoqlashishiga qarshilik qiladi. Tekis parallel elektrodlar uchun ideal vakuum diodning fazoviy zaryad bilan cheklangan tok zichligi Child-Langmuir qonuni bilan tavsiflanadi:

$$J = \left(\frac{4 \epsilon_0}{9} \right) \sqrt{2e/m} \cdot U^{3/2} / d^2$$

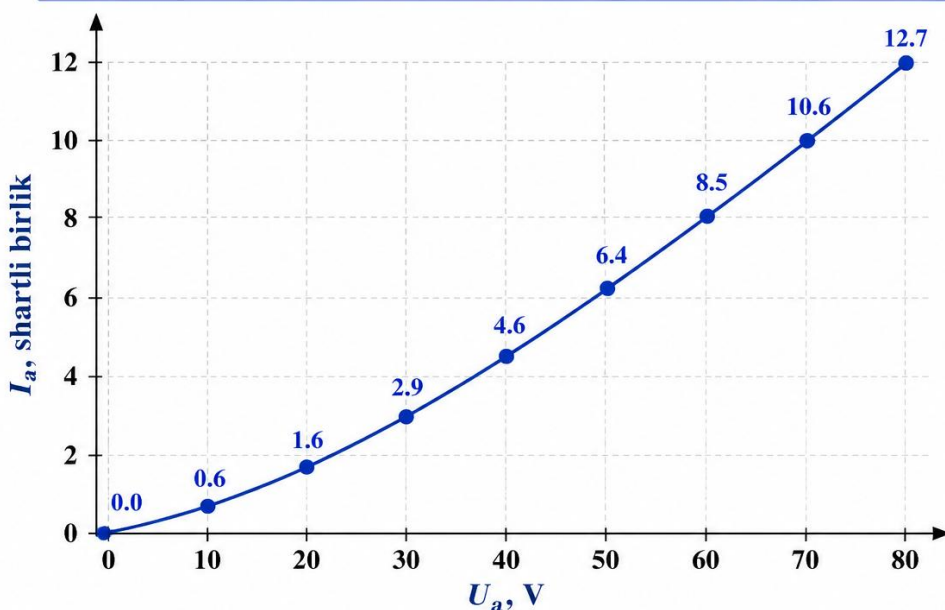
Bu yerda d - katod va anod orasidagi masofa. Demak, fazoviy zaryad rejimida tok kuchlanishning $3/2$ darajasiga proporsional:

$$I_a \propto U_a^{3/2}$$

$$\text{Fazoviy zaryad rejimi: } I_a \propto U_a^{3/2}$$

Vakuum diodda anod kuchlanishi U_a ortishi bilan anod toki I_a fazoviy zaryad rejimida quyidagi qonun bo'yicha ortadi:

$$I_a = k U_a^{3/2} \quad \text{yoki} \quad I_a \propto U_a^{3/2}$$



Izoh:

Anodga nisbatan musbat U_a berilganda, katoddan chiqqan elektronlar anodga harakatlanadi. Elektronlar orasidagi o'zaro itarilish (fazoviy zaryad) tufayli ularning harakati cheklanadi. Natijada tok $U_a^{3/2}$ ga proporsional ravishda ortadi.

Matematik ifoda:

$$I_a = k U_a^{3/2}$$

bu yerda k – doimiy.

Asosiy xulosa:

Katta U_a da vakuum diodning volt-ampér xarakteristikasi quyidagi qonun bilan tasvirlanadi:

$$I_a \propto U_a^{3/2}$$



Fazoviy zaryad rejimi vakuum diodda elektronlar konsentratsiyasi kichik va anodga yetib borishdan oldin o'zaro itarilish kuchlari ustun bo'lgan sohada kuzatiladi.

4-rasm. Fazoviy zaryad bilan cheklangan tokning anod kuchlanishiga bog'liqligi

Ushbu qonun termoemissiya miqdori yetarlicha katta, ammo anod maydoni barcha elektronlarni tez olib ketishga yetmaydigan oraliq rejimni ifodalaydi.

4-misol

Bir xil geometriyalı diodda anod kuchlanishi 20 V dan 80 V gacha, ya'ni 4 marta oshirilsa, Child-Langmuir rejimida tok $4^{3/2} = 8$ marta ortadi.

Masalan, 20 V da $I=2$ mA bo'lsa, ideal fazoviy zaryad modelida 80 V da $I \approx 16$ mA bo'ladi.

5. To'yinish toki va Richardson-Dushman qonuni

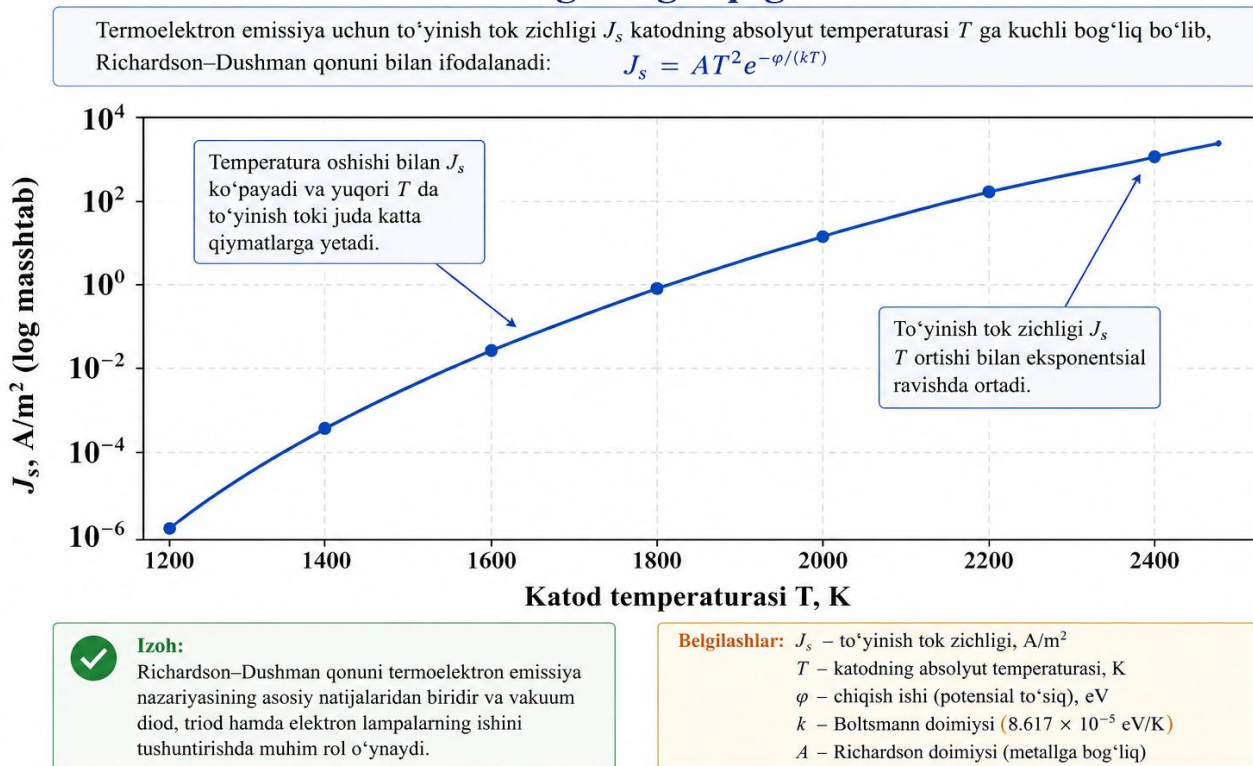
To'yinish rejimida anod toki anod kuchlanishidan ko'ra katodning elektron chiqarish qobiliyati bilan belgilanadi. Termoelektron emissiyaning tok zichligi Richardson-Dushman tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$J_s = A_R T^2 \exp[-\phi/(k_B T)]$$

Bu yerda J_s - to'yinish tok zichligi, A_R - Richardson doimiysi yoki materialga bog'liq effektiv koeffitsient, T - absolyut temperatura, ϕ - chiqish ishi, k_B - Boltsman doimiysi.

Formula temperaturaning emissiyaga nihoyatda kuchli ta'sirini ko'rsatadi. T^2 ko'paytuvchi bilan birga eksponensial had mavjudligi sababli katod temperaturasi ortganda to'yinish toki juda tez oshadi.

Richardson–Dushman qonuni: to'yinish tok zichligining T ga bog'liqligi



5-rasm. To'yinish tok zichligining katod temperaturasiga eksponensial kuchli bog'liqligi
 Katod yuzasi S bo'lsa:

$$I_s = J_s S$$

5-misol

Bir xil katod uchun $T_1=1800$ K va $T_2=2000$ K, $\phi=4.5$ eV bo'lsin. Richardson-Dushman formulasi bo'yicha nisbat $J_2/J_1=(T_2/T_1)^2 \exp[\phi/k_B(1/T_1-1/T_2)]$ taxminan 22 ga yaqin. Ya'ni temperatura atigi 11% ga oshsa ham emissiya o'nlab marta ortishi mumkin.

6. Richardson-Dushman tenglamasini tahlil qilish

Richardson-Dushman tenglamasini logarifmlash tajribaviy ma'lumotlarni tahlil qilish uchun qulay shakl beradi:

$$\ln(J_s/T^2) = \ln(A_R) - \phi/(k_B T)$$

Agar $y=\ln(J_s/T^2)$ va $x=1/T$ deb olinsa, ideal modelda $y(x)$ chiziqli bo'ladi. Chiziqlarning qiyaligi $-\phi/k_B$ ga teng. Shu usul bilan tajribada katod materialining effektiv chiqish ishini aniqlash mumkin.

O'zgarish	Richardson-Dushman bo'yicha natija
T ortadi	J_s keskin ortadi
ϕ ortadi	Emissiya eksponensial kamayadi
Katod yuzi S ortadi	I_s proporsional ortadi
Anod kuchlanishi to'yinishdan keyin ortadi	I_s deyarli o'zgarmaydi

6-misol

$T=2000$ K, $\phi=4.5$ eV va $A_R=1.2 \times 10^6$ A/(m² K²) deb ideal baholansa, $J_s=A_R T^2 \exp[-\phi/(k_B T)] \approx 2.2 \times 10^1$ A/m² tartibida chiqadi. $S=1$ cm²=10⁻⁴ m² katod uchun $I_s \approx 2.2$ mA.

Real katodlarda sirtning ifloslanishi, kristall tuzilma, qoplama va elektr maydon emissiya qiymatini ideal formuladan chetlashtirishi mumkin. Shu sababli A_R ko'pincha effektiv parametr sifatida olinadi.

7-misol: chiqish ishini taqqoslash

Bir xil T va yuzada ϕ qiymati kichik bo'lgan katodning emissiyasi katta bo'ladi. Masalan, chiqish ishi 0.5 eV ga kamayganda emissiya $\exp[0.5/(k_B T)]$ koeffitsientga ortadi. $T=2000$ K da bu taxminan 18 marta.

7. Vakuum diodda energiya va elektron harakati

Katoddan chiqqan elektron anod elektr maydonida tezlanadi. Agar boshlang'ich kinetik energiya anod kuchlanishi hisobiga olingan energiyaga nisbatan kichik bo'lsa:

$$e U_a = m v_a^2 / 2$$

Shundan:

$$v_a = \sqrt{2 e U_a / m}$$

Elektron anodga urilganda uning kinetik energiyasi issiqlikka, ikkilamchi elektron emissiyaga yoki boshqa jarayonlarga aylanishi mumkin. Yuqori kuchlanishli vakuum qurilmalarida anodning qizishi muhim texnik masaladir.

8-misol

$U_a=400$ V bo'lsa, elektronning anod oldidagi kinetik energiyasi taxminan 400 eV. Norelativistik tezlik $v \approx 1.19 \times 10^7$ m/s.

Rejim	Asosiy cheklov	Tokning bog'lanishi
Teskari anod kuchlanishi	Elektronlar qaytariladi	I_a juda kichik
Kichik musbat U_a	Fazoviy zaryad kuchli	I_a kuchlanish bilan tez ortadi
Child-Langmuir sohasi	Fazoviy zaryad	$I_a \sim U_a^{(3/2)}$

To'yinish	Katod emissiyasi	$I_a \approx I_s(T)$
-----------	------------------	----------------------

Amaliy qo'llanishlar

Termoelektron emissiya vakuum elektron lampalarida, katod-nur trubkalarida, elektron mikroskoplarda, elektron-nur payvandlash qurilmalarida, rentgen trubkalarida va ayrim yuqori quvvatli mikroto'lqin generatorlarida elektron manbai sifatida ishlatiladi. Zamonaviy qurilmalarda termoemissiya bilan bir qatorda fotoemissiya va maydon emissiyasi ham qo'llanadi.

8. Darsda mavzuni tushuntirish algoritmi

Bosqich	Metodik mazmun
1	Vakuumdagi nega oddiy holatda tok yo'qligini muammoli savol orqali ochish.
2	Qizdirilgan katoddan elektron chiqishini termoemissiya sifatida tushuntirish.
3	Chiqish ishi ϕ va sirt potensial to'sig'ini energetik rasm orqali ko'rsatish.
4	Vakuumdiod sxemasida anod kuchlanishining elektronlar harakatiga ta'sirini tahlil qilish.
5	Volt-amper xarakteristikada fazoviy zaryad, Child-Langmuir va to'yinish sohaslarini ajratish.
6	Richardson-Dushman formulasi orqali temperaturaning to'yinish tokiga ta'sirini tushuntirish.
7	Hisoblash misollari va grafiklarni o'zaro bog'lab, fizik xulosa chiqarish.

Muammoli savollar

Nima uchun vakuumda tok hosil bo'lishi uchun elektron manbai kerak? Katodni qizdirish elektronlarni qanday qilib vakuumga chiqaradi? Nima uchun kichik anod kuchlanishida tok U ga chiziqli bog'lanmaydi? Fazoviy zaryad qanday paydo bo'ladi? Nima uchun to'yinish rejimida anod kuchlanishini oshirish tokni deyarli oshirmaydi? Temperaturaning kichik o'zgarishi nima sababdan emissiyani juda kuchli o'zgartiradi?

Ko'p uchraydigan xatolar

Vakuumni 'mutlaqo zarrachasiz fazo' deb talqin qilish; termoemissiyani atomlarning katoddan uchib chiqishi deb tushunish; elektronlar yo'nalishini shartli tok yo'nalishi bilan bir xil olish; to'yinish tokini anod kuchlanishiga proporsional deb hisoblash; Child-Langmuir qonunini to'yinish sohasiga qo'llash; Richardson-Dushman formulasidagi temperaturani Selsiyda qo'llash. Formulada T faqat kelvinlarda olinadi.

Nazorat uchun qisqa test

1) Termoelektron emissiya nima? 2) Chiqish ishi qanday fizik ma'noga ega? 3) Fazoviy zaryad nima? 4) Child-Langmuir qonunidagi $3/2$ daraja qaysi rejimga tegishli?

5) To'yinish tokini asosan qaysi parametr belgilaydi? 6) Richardson-Dushman formulasida temperatura qanday birlikda olinadi?

9. Asosiy formulalar, mustaqil topshiriqlar va xulosa

Formula	Fizik mazmun
$F = -eE$	Vakuumdagi elektronga elektr kuchi
$eU = mv^2/2$	Elektronning maydonda tezlanishi
$I = Ne/t$	Elektronlar oqimidan tok
$J = (4\epsilon_0/9)\sqrt{2e/m} U^{(3/2)}/d^2$	Child-Langmuir qonuni
$I \sim U^{(3/2)}$	Fazoviy zaryad rejimi
$J_s = A_R T^2 \exp[-\phi/(k_B T)]$	Richardson-Dushman qonuni
$I_s = J_s S$	To'yinish toki
$\ln(J_s/T^2) = \ln A_R - \phi/(k_B T)$	Chiqish ishini tajribaviy aniqlash shakli

Mustaqil topshiriqlar

1. $U = 250$ V da tezlashtirilgan elektronning energiyasini eV va J da toping.
2. Bir sekundda 5×10^{16} elektron anodga yetsa, anod tokini hisoblang.
3. Child-Langmuir rejimida kuchlanish 3 marta oshsa, tok necha marta o'zgaradi?
4. $T = 1900$ K va 2100 K uchun $\phi = 4.0$ eV bo'lganda emissiya tok zichliklari nisbatini Richardson-Dushman formulasi orqali toping.
5. Katod yuzasi 2 cm^2 va $J_s = 30 \text{ A/m}^2$ bo'lsa, to'yinish tokini aniqlang.
6. Richardson grafigi $\ln(J_s/T^2)$ ning $1/T$ ga bog'liqligi nima sababdan to'g'ri chiziq bo'lishini izohlang.

Yakuniy xulosa

Vakuumba elektr toki elektrod sirtidan chiqarilgan zaryad tashuvchilarning elektr maydon ta'siridagi yo'nalgan harakatidir. Termoelektron emissiyada katodning qizishi elektronlarning sirt potensial to'sig'ini yengib vakuumga chiqish ehtimolini oshiradi. Vakuum diodning volt-ampere xarakteristikasida kichik anod kuchlanishlarida fazoviy zaryad muhim rol o'ynaydi va ideal tekis geometriyada tok Child-Langmuir qonuniga muvofiq $U^{(3/2)}$ ga bog'liq. Yetarlicha katta anod kuchlanishida barcha mavjud termoelektronlar anodga yig'ilib, to'yinish toki yuzaga keladi. To'yinish tok zichligi Richardson-Dushman qonuni $J_s = A_R T^2 \exp[-\phi/(k_B T)]$ bilan aniqlanib, temperatura va chiqish ishiga nihoyatda kuchli bog'liq. Ushbu qonuniyatlar vakuum elektronikasining nazariy asosini tashkil etadi.

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. Serway R. A., Jewett J. W. Physics for Scientists and Engineers. Cengage.
4. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Wiley.