

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

Hustota elektrónových stavov v kove so slabým disorderom a
slabou elektrón-elektrónovou interakciou:

Jav Altshulera-Aronova

DIPLOMOVÁ PRÁCA

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

**Hustota elektrónových stavov v kove so slabým disorderom a
slabou elektrón-elektrónovou interakciou:**

Jav Altshulera-Aronova

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program: Fyzika
Študijný odbor: 17827 Fyzika
Školiace pracovisko: Katedra experimentálnej fyziky
Vedúci práce: Doc. RNDr. Martin Moško, DrSc.
Konzultant: RNDr. Antónia Mošková, CSc.



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Matúš Jenča
Študijný program: fyzika tuhých látok (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: fyzika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Hustota elektrónových stavov v kove so slabým disorderom a slabou elektrón-elektrónovou interakciou: Jav Altshulera-Aronova
Density of electron states in metal with weak disorder and weak electron-electron interaction: Altshuler-Aronov effect

Anotácia: Elektrón-elektrónová interakcia v kombinácii s disorderom spôsobuje v kovoch potlačenie hustoty elektrónových stavov v blízkom okolí Fermiho energie. Toto zmenšenie hustoty stavov blízko Fermiho energie, známe ako jav Altshulera-Aronova, je pozorovateľné metódami tunelovej spektroskopie a fotoelektrónovej spektroskopie. Cieľom tejto diplomovej práce bude teoretický výpočet hustoty stavov. Diplomant sa naučí ako počítať hustotu stavov v elektrónovom plyne, v ktorom elektróny interagujú cez slabú Hartree-Fockovú interakciu a zároveň sú vystavené pôsobeniu slabého náhodného potenciálu disorderu. Diplomant najprv zreprodukuje pre rôzne dimenzionality výsledok Altshulera-Aronova platný v blízkom okolí Fermiho energie. Potom sa pokúsi AA výsledok zobecniť aj mimo blízke okolie Fermiho energie a zobecnený výsledok porovnať s nedávnymi experimentami.

Vedúci: doc. RNDr. Martin Moško, DrSc.
Konzultant: RNDr. Antónia Mošková, PhD.
Katedra: FMFI.KEF - Katedra experimentálnej fyziky
Vedúci katedry: prof. Dr. Štefan Matejčík, DrSc.
Dátum zadania: 18.11.2019

Dátum schválenia: 10.12.2019

prof. RNDr. Peter Kúš, DrSc.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Čestne prehlasujem, že som túto prácu - *Hustota elektrónových stavov v kove so slabým disorderom a slabou elektrón-elektrónovou interakciou: Jav Altshulera-Aronova* - vypracoval samostatne, na základe konzultácii a použitej literatúry.

Neporušil som autorský zákon, a zoznam použitej literatúry som uviedol na príslušnom mieste.

V Bratislave, dňa 5. januára 2022

Matúš Jenča

Podakovanie Práca bola vypracovaná na Katedre experimentálnej fyziky FMFI UK a na Elektrotechnickom ústave SAV.

Moja vďaka patrí najmä môjmu školiťovi, Doc. RNDr. Martinovi Moškovi, DrSc. za podklady a ochotu konzultovať. Tak isto ďakujem aj mojej konzultantke RNDr. Antónii Moškovej, CSc. za odbornú pomoc. Napokon by som chcel poďakovať mojim rodičom za podporu počas celého vysokoškolského štúdia.

Abstrakt v štátnom jazyku

Sample Text

Kľúčové slová: Sample Keyword

Abstract

Sample Text

Keywords: Sample Keyword

Obsah

Úvod	8
1 Elektróny v kovovej mriežke s disorderom : Altshuler-Aronovova aproximácia	8
2 Experimentálne meranie ustoty stavov v disorderovanom kove	16
3 Odvodenie Kubovej Formuly	19
Záver	21
Zoznam použitej literatúry	22

Úvod

Úvod

1 Elektróny v kovovej mriežke s disorderom : Altshuler-Aronovova aproximácia

V tejto kapitole si zavedieme základné pojmy týkajúce sa problému elektrónov v kove s disorderom.

Elektrón v kovovej mriežke popisujeme vlnovou funkciou $\phi(\vec{r}, t)$. Hamiltonián problému rozdelíme na tri časti:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{int} + \hat{H}_{dis}, \quad (1)$$

kde $H_0 = \frac{\hbar^2}{2m}\Delta$ je hamiltonián voľnej častice, H_{int} popisuje interakciu z iónmi v mriežke, ako aj elektrón elektrónovú (ee) interakciu a H_{dis} popisuje disorder.

Ak uvažujeme elektrón ako voľnú časticu H_0 , dostaneme najhrubšiu aproximáciu, kde vieme nájsť bázové funkcie $\phi(\vec{r})$. Použitím Born von Karmanovej periodickej okrajovej podmienky (PBC) dostávame

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \frac{\mathcal{E}(k)t}{\hbar})}, \quad (2)$$

kde V je Born von Karmanov objem. Energia takejto vlnovej funkcie je

$$\mathcal{E}(k) = \frac{\hbar k^2}{2m} \quad (3)$$

Použitím PBC dostávame diskkrétne hodnoty vektora \vec{k} (vektory recipročnej mriežky). Elektróny sú fermióny, a v recipročnom priestore tvoria guľu. Polomer tejto gule nazývame Fermiho polomerom. Ak poznáme elektrónovú koncentráciu, vieme určiť Fermiho Polomer

$$k_F = (3\pi^2 n_e)^{\frac{1}{3}}. \quad (4)$$

Energia elektrónov na Fermiho polomeri nazývame Fermiho energiou

$$\mathcal{E}_F = \frac{\hbar k_F^2}{2m} \quad (5)$$

Pri integrovaní cez Fermiho guľu vieme zameniť súradnicu polomeru k za energiu. Jakobián takejto zámeny súradníc dáva dôležitú veličinu: hustotu stavov.

Vzťah pre hustotu stavov všeobecného systému budeme v ďalšom písať ako

$$\rho(E) = \frac{1}{\pi^2} \frac{dk}{dE} k^2. \quad (6)$$

Druhý člen v (1) popisuje Hartree-Fockova teória, ktorá je štandardne pokrytá v učebniciach, preto ju v tejto práci nebudeme rozoberať. Uvedieme len toľko, že výpočet hustoty stavov nám pre interakciu cez Coulombovský potenciál $V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_\infty |\vec{r} - \vec{r}'|}$ nám na fermiho hladine dá nulovú hustotu stavov, čo je v rozpore s realitou. Preto musíme použiť Yukkavov tienený potenciál.

$$V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_\infty |\vec{r} - \vec{r}'|} \exp^{-k_s r}, \quad (7)$$

kde k_s je recipročná tieniaca dĺžka. Pre náš výpočet je dôležitá jeho Fourierova transformácia

$$V_3(\vec{q}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4\pi e^2}{q^2 + k_s^2} \quad (8)$$

Posledný člen popisuje disorder, náhodný potenciál od prímiesí. Práve jemu sa budeme podrobne venovať. Bez ee interakcie máme Schrödingerovu rovnicu

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V_{dis}(\vec{r})\right)\phi_m(\vec{r}) = \mathcal{E}_m\phi_m(\vec{r}). \quad (9)$$

Altschuler a Aronov (AA) riešili problém pomocou Greenových funkcií, ktoré sú nad rámec magisterského štúdia. Preto použijeme štandardný formalizmus vlnových funkcií.

Problém AA budeme riešiť poruchovou metódou, kde (9) bude neporušený problém a porucha zapríčinená interakciou bude

$$\hat{H}' = \sum_{\forall m'} \int d\vec{r}' \phi_{m'}^*(\vec{r}) \phi_m(\vec{r}') V(|\vec{r} - \vec{r}'|) \phi_m'(\vec{r}). \quad (10)$$

Riešime teda $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$ v nultom ráde poruchovej teórie, takže dosádzame rovno vlnové funkcie neporušeného problému $\phi_m(r)$, $\phi_m'(r)$ a ich vlastné hodnoty \mathcal{E}_m . V poruchovo člene (10) je vhodné urobiť Fourierovu transformáciu a zaviesť $\vec{q} = \vec{k} - \vec{k}'$. Po algebraických úpravách dostávame

$$E_m = \mathcal{E}_m - \sum_{\forall m'} \int d\vec{q} V(|\vec{q}|) \langle \phi_m | e^{i\vec{q} \cdot \vec{r}} | \phi_{m'} \rangle^2. \quad (11)$$

Samotný charakter $V_{dis}(\vec{r})$ naznačuje že úloha nie je analyticky riešiteľná. Ide náhodný potenciál závisiaci od porúch v kryštalickej mriežke. Pre každú mriežku môžeme mať iné

$V_{dis}(\vec{r})$, preto aj iné vlastné vektory $\phi_m(r)$, $\phi'_m(r)$ a vlastné hodnoty \mathcal{E}_m . Je teda vhodné zaviesť štatistický súbor disorderov a hodnôt kvantového čísla m .

$$\overline{E_m} = \overline{\mathcal{E}_m} - \sum_{\forall m'} \int d\vec{q} V(|\vec{q}|) \overline{|\langle \phi_m | e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} | \phi_{m'} \rangle|^2}. \quad (12)$$

Maticový element vieme vypočítať aj bez znalosti vlnových funkcií pomocou aproximácie elektrónu vlnovým balíkom.

Elektrón považujeme za klasickú časticu. Disorder vieme aproximovať náhodnými bodmi na ktoré bude častica elasticky narážať. Ide teda o Brownov pohyb, a pravdepodobnosť výskytu častice popisuje difúzna rovnica

$$P(\vec{r}, t) = \frac{1}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4Dt}}, \quad (13)$$

kde D je difúzny koeficient úmerný Fermiho energii.

Z vyššie uvedenej úvahy vyplýva, že môžeme postulovať

$$\psi^*(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t) \simeq \frac{1}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4Dt}}, \quad (14)$$

kde $\psi(\vec{r}, t)$ je vlnový balík častice, ktorý vieme vyjadriť v báze vlastných funkcií nášho skúmaného systému

$$\psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_m \phi_m^*(\vec{r}_0) \phi_m(\vec{r}) e^{-i\frac{E_m}{\hbar}t}. \quad (15)$$

Postulát (14) platí len za určitých predpokladov. Prísne vzaté, rovnosť (14) nemôže platiť, pretože porovnáva klasickú časticu s ostrou hodnotou energie s vlnovým balíkom (preto je v rovnici znak \simeq). Preto sa v sume (15) obmedzíme na také stavy ϕ_m pre ktoré platí $E = \mathcal{E}_F + \Delta E$ kde ΔE je rozumne malé.

Dosadíme teda rozklad (15) do (14)

$$\frac{1}{N} \sum_m \sum_{m'} \phi_m^*(\vec{r}_0) \phi_{m'}^*(\vec{r}) \phi_m(\vec{r}) \phi_{m'}(\vec{r}_0) e^{-i\frac{E_m - E_{m'}}{\hbar}t} = \frac{1}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4Dt}}, \quad (16)$$

kde vydelením počtom členov sumy N sme dostali strednú hodnotu cez m . Z rovnice (16) vyjadriť z nej maticový element .

Úpravy sú však netriviálne, preto ich uvedieme detailnejšie. Pre väčšiu prehľadnosť textu budeme riešiť ľavú a pravú stranu rovnice osobitne.

Vezmime najprv ľavú stranu rovnice (16). Násobíme ju výrazom $e^{-i\vec{q}(\vec{r}-\vec{r}_0)}$, integrujeme cez $\int d\vec{r}$ a $\int d\vec{r}_0$, a ešte násobíme $\frac{1}{V}$, kde V je integračný objem. Stredovaciu čiaru na chvíľu

vynecháme a upravujeme.

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{NV} \sum_m \sum_{m'} \int d\vec{r}_0 \phi_m^*(\vec{r}_0) \phi_{m'}(\vec{r}_0) e^{i\vec{q}\vec{r}_0} \int d\vec{r} e^{-i\vec{q}\vec{r}} \phi_m(\vec{r}) \phi_{m'}(\vec{r}) e^{-i\frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'}}{\hbar} t} \\
&= \frac{1}{NV} \sum_m \sum_{m'} \left| \int d\vec{r} e^{-i\vec{q}\vec{r}} \phi_m(\vec{r}) \phi_{m'}(\vec{r}) \right|^2 e^{-i\frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'}}{\hbar} t} \\
&= \frac{1}{NV} \sum_m \sum_{m'} |M_{mm'}|^2 e^{-i\frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'}}{\hbar} t}.
\end{aligned}$$

kde nám už vznikol štvorec maticového elementu $|M_{mm'}|^2$, ktorý chceme vypočítať. Teraz ešte na posledný riadok aplikujme Fourierovu transformáciu v tvare $Re(\int_0^\infty dt e^{i\omega t})$.

Dostaneme

$$\frac{1}{NV} \sum_m \sum_{m'} |M_{mm'}|^2 Re(\int_0^\infty dt e^{-i\frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'}}{\hbar} t} e^{i\omega t}). \quad (17)$$

Upravíme si výraz $Re(\int_0^\infty dt e^{-i\frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'}}{\hbar} t} e^{i\omega t})$:

$$\begin{aligned}
& Re(\int_0^\infty dt e^{-i\omega_{mm'} t} e^{i\omega t}) = \\
& \frac{1}{2} \left(\int_0^\infty dt e^{-i(\omega_{mm'} - \omega)t} + \int_0^\infty dt e^{i(\omega_{mm'} - \omega)t} \right) = \frac{1}{2} \left(\int_0^\infty dt e^{-i(\omega_{mm'} - \omega)t} + \int_{-\infty}^0 dt e^{-i(\omega_{mm'} - \omega)t} \right) = \\
& \frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty dt e^{-i(\omega_{mm'} - \omega)t} = \pi \delta(\omega_{mm'} - \omega),
\end{aligned}$$

kde $\omega_{mm'} = \frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'}}{\hbar}$. Výraz (17) tak nadobudne tvar

$$\frac{1}{NV} \sum_m \sum_{m'} |M_{mm'}|^2 \pi \delta(\omega_{mm'} - \omega), \quad (18)$$

kde sme už vrátili stredovanie cez disorder. Tento výraz môžeme ľahko integrovať vďaka prítomnosti delta funkcie. Integrujeme cez $\mathcal{E}_{m'}$ tak že prejdeme od sumy k integrálu.

Dostaneme

$$\frac{\pi \hbar}{N} \sum_m \int d\mathcal{E}_{m'} \rho(\mathcal{E}_{m'}) \delta(\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_{m'} + \hbar\omega) |M_{mm'}|^2 = \frac{\pi \hbar}{N} \sum_m \rho(\mathcal{E}_m + \hbar\omega) \overline{|M_{(\mathcal{E}_m)(\mathcal{E}_m + \hbar\omega)}|^2}, \quad (19)$$

kde $\rho(\mathcal{E})$ je hustota stavov, ktorú pre slabý disorder môžeme približne považovať za hustotu stavov voľných elektrónov a vyňať ju zo stredovania. Konečne, sumu $N^{-1} \sum_m$ môžeme chápať ako stredovanie cez stavy m a dostávame záverečný výsledok

$$\pi \hbar \rho(\mathcal{E}_m + \hbar\omega) \overline{|M_{(\mathcal{E}_m)(\mathcal{E}_m + \hbar\omega)}|^2}, \quad (20)$$

ktorý chápeme ako vystredovaný cez m .

Teraz tým istým spôsobom upravíme pravú stranu rovnice (16). Násobíme ju výrazom $e^{-i\vec{q}(\vec{r}-\vec{r}_0)}$, integrujeme cez $\int d\vec{r}$ a $\int d\vec{r}_0$, a násobíme $\frac{1}{V}$. Dostaneme

$$\frac{1}{(4\pi Dt)^{3/2}} \frac{1}{V} \int d\vec{r} \int d\vec{r}_0 e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4Dt}} e^{-i\vec{q}(\vec{r}-\vec{r}_0)} = \frac{1}{(4\pi Dt)^{3/2}} \int d\vec{r} e^{-\frac{|\vec{r}|^2}{4Dt}} e^{-i\vec{q}\vec{r}}, \quad (21)$$

pravú stranu môžeme faktorizovať na súčin troch rovnakých integrálov v premenných x, y, z a každý vypočítať. Napr. integrál cez x dá

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-\frac{x^2}{4Dt}} e^{-iq_x x} = \\ & \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-\frac{(x-2iq_x t)^2}{4Dt} - q_x^2 Dt} = \\ & \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} ds e^{-s^2} e^{-q_x^2 Dt} = e^{-q_x^2 Dt}. \end{aligned}$$

a analogicky pre y a z . Týmto sa pravá strana rovnice (16) pretransformovala na tvar $e^{-q^2 Dt}$, ktorý ešte transformujeme Fourierovou transformáciou cez čas:

$$Re \int_0^{\infty} dt e^{i\omega t} e^{-q^2 Dt} = Re \left(\frac{1}{-i\omega + q^2 D} \right) = \frac{q^2 D}{\omega^2 + q^4 D^2}. \quad (22)$$

Posledný výsledok je rovný výrazu (20), odkiaľ nachádzame hľadaný výsledok

$$|M_{mm'}|^2 = \frac{\hbar D q^2}{\rho(E'_m)(E_m - E_{m'})^2 + (\hbar D q^2)^2}. \quad (23)$$

Vezmime vzťah (12) a vystredujme ho cez všetky energie $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}$. Dostaneme

$$\tilde{E}(E) = \bar{\mathcal{E}} + E_{self}(E), \quad (24)$$

kde $\bar{\mathcal{E}}$ je rovné energii voľnej častice selfenergia má tvar

$$E_{self} = - \int_0^{E_F} dE' \int \frac{d\vec{q}}{8\pi^3} V(q) \frac{\rho(E) \hbar D q^2}{(\hbar D q^2) + (E - E')}, \quad (25)$$

v ktorom sme prešli od sumy cez m' k integrálu cez energiu ako $dm' = \rho(E')dE'$.

Hustotu stavov vyjadríme z (24). Celú rovnicu pre energiu derivujeme podľa počtu stavov n .

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{E}(E)}{dn} &= \frac{d\mathcal{E}}{dn} + \frac{dE_{self}(E)}{dn} \\ \frac{d\tilde{E}(E)}{dn} &= \frac{d\mathcal{E}}{dn} + \frac{dE_{self}(E)}{dE} \frac{dE}{dn} \\ \frac{d\tilde{E}(E)}{dn} &= \frac{d\mathcal{E}}{dn} \left(1 + \frac{dE_{self}(E)}{dE} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Keďže hustota stavov je derivácia počtu stavov podľa energie, pre hustotu stavov dostávame

$$\rho(E) = \rho_0(E) \frac{1}{1 + \frac{dE_{self}(E)}{dE}}, \quad (27)$$

kde $\rho_0(E)$ je hustota stavov pre voľný elektrón (6). Pre malé $\frac{dE_{self}(E)}{dE}$ urobíme Taylorov rozvoj:

$$\rho(E) \doteq \rho_0(E_F) \left[1 - \frac{dE_{self}(E)}{dE} \right], \quad (28)$$

Zavedením jednoduchých substitúcií integrál (29) prejde na

$$E_{self} = \int_0^\epsilon d\epsilon' \int \frac{d\vec{q}}{8\pi^4} V(\vec{q}) \frac{\hbar D q^2}{(\hbar D q^2)^2 + (\epsilon')^2}. \quad (29)$$

Teraz urobíme takzvanú aproximáciu nekonečného pásu, čiže dno energetického pásu presunieme do $-\infty$. Po ďalších substitúciách sa táto aproximácia prejaví ako

$$E_{self} = \int_\epsilon^\infty d\epsilon' \int \frac{d\vec{q}}{8\pi^4} V(\vec{q}) \frac{\hbar D q^2}{(\hbar D q^2)^2 + (\epsilon')^2}. \quad (30)$$

Z definície derivácie potom vieme vyjadriť deriváciu self energie ako

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = \int \frac{d\vec{q}}{8\pi^3} V(\vec{q}) \frac{\hbar D q^2}{(\hbar D q^2)^2 + (\epsilon)^2}. \quad (31)$$

Týmto sme vyriešili jeden integrál, ostáva nám integrovať cez $d\vec{q}$. Prejdeme do sférických súradníc:

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{4\pi}{8\pi^3} \int_0^\infty dq q^2 V(q) \frac{\hbar D q^2}{(\hbar D q^2)^2 + (\epsilon)^2}. \quad (32)$$

$$\rho(E) = \rho_0(E_F) \left[1 - \frac{4U_i}{\pi^2 U_{co} l k_s} + \frac{2U_i}{\pi U_{co} \sqrt{2\hbar D k_s^2}} \sqrt{\epsilon} \right]. \quad (33)$$

Keďže sme substituovali $\epsilon = E - E_F$, vieme že na Fermiho energii bude $\epsilon = 0$, teda hustota stavov bude:

$$\rho(E_F) = \rho_0(E_F) \left[1 - \frac{4U_i}{\pi^2 U_{co} l k_s} \right]. \quad (34)$$

Hustotu stavov potom možno skrátene písať ako:

$$\rho(E) = \rho(E_F) + \rho_0(E_F) \frac{2U_i}{\pi U_{co} \sqrt{2\hbar D k_s^2}} \sqrt{\epsilon}. \quad (35)$$

Zostáva nám už len vyjadriť si substituované členy. Po dosadení za substituované premenné a za $k_s = \sqrt{\frac{\epsilon^2 \rho_0(E_F)}{\epsilon_0}}$ dostaneme finálny Altshuler-Aronovov vzťah pre hustotu stavov

$$\rho_3(E) = \rho(E_F) + \frac{\sqrt{|E - E_F|}}{4\sqrt{2}\pi^2 (\hbar D)^{3/2}}. \quad (36)$$

Vypočítali sme hustotu stavov v disorderovanom systéme v 3D priestore. V nasledujúcich kapitolách budeme potrebovať aj 2D a 1D prípady.

Aproximácia cez difúznú rovnicu a maticový element, na základe ktorého sme vypočítali 3D prípad platí aj v iných dimenziách. Jeden rozdiel vo výpočtoch hustoty stavov 2D a 1D však bude v integračných súradniciach a jakobiánoch. Druhý rozdiel bude vo fourierových transformáciach Yukkavovského potenciálu. Tieto transformácie, vzhľadom na zdĺhavosť výpočtov nebudeme odvodzovať, iba ich uvedieme: [1]

$$V_2(\vec{q}) = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{e^2}{|q| + |k_2|} \quad (37)$$

$$V_1(q) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{e^2\rho_0 + \ln^{-1}(\frac{1}{q^2a^2})} \quad (38)$$

Kde $k_2 = 2\pi e^2\rho_0$ je recipročná dĺžka v 2D.

V oboch prípadoch môžeme pri dostatočne malom ohraničení integrálu cez $d\vec{q}$ uvažovať limitu $q \rightarrow 0$, čo dáva vo všetkých prípadoch ako konštantný potenciál

$$V(q) = \frac{1}{\rho_0}. \quad (39)$$

Teraz nám už zostáva iba riešiť rovnicu (45) dosadením potenciálu (39) za $V(\vec{q})$. Najskôr počítame pre 2D

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{\hbar D}{2\pi^2} \frac{1}{\rho_0} \int_0^{\frac{\sqrt{2}}{l}} dq \frac{q^3}{(\hbar D q^2)^2 + (\epsilon)^2}. \quad (40)$$

Tento integrál je ľahko vyčísliteľný, stačí použiť substitúciu $x = \hbar^2 D^2 q^4$. Dostaneme výsledok

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{1}{8\pi^2 \rho_0 \hbar D} \ln\left(\frac{1 + (\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2}{(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2}\right), \quad (41)$$

kde $\epsilon_0 = \hbar D \frac{\sqrt{2}}{l}$. Pre malé ϵ , teda pre energie v okolí Fermiho energie, môžeme člen $(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2$ v čitateli (41) zanedbať. Potom vieme exponent vyňať pred logaritmu a dostaneme

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = -\frac{1}{4\pi^2 \rho_0 \hbar D} \ln\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right). \quad (42)$$

Teraz nám stačí len dosadiť za ϵ_0 a následne upraviť (42) pomocou vzťahov $l = v_F \tau$ a $D = \frac{1}{2} v_F l$. Dostaneme finálny vzťah

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = -\frac{1}{4\pi^2 \rho_0 \hbar D} \ln\left(\frac{\tau \epsilon}{\hbar}\right). \quad (43)$$

Hustota stavov podľa rovnice (28) bude

$$\rho_2(E) = \rho_{02}(E_F) \left[1 - \frac{1}{4\pi^2 \rho_0 \hbar D} \ln \left(\frac{\tau(|E - E_F|)}{\hbar} \right) \right] \quad (44)$$

Na rozdiel od 3D prípadu (36), kde sme dostali odmocninovú závislosť, v 2D prípade (43) máme logaritmickú závislosť.

V 1D prípade nemusíme zamieňať súradnice, integrujeme rovno cez jednorozmernú premennú q .

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{\hbar D}{2\pi} \int_0^\infty dq \frac{q^2}{(\hbar D q^2)^2 + (\epsilon)^2}. \quad (45)$$

Tento integrál nieje až tak triviálny ako v 2D prípade. Vieme ho upraviť do tvaru:

$$\frac{1}{2\pi^2 \epsilon_0 q_0 \rho_0} \int_0^1 dx \frac{x^2}{x^4 + \alpha^2} \quad (46)$$

kde $\epsilon_0 = \sqrt{\frac{\hbar D}{\epsilon}}$ a $\alpha = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$. Určíme primitívnu funkciu

$$P(x) = \frac{1}{2\pi^2 \epsilon_0 q_0 \rho_0} \frac{1}{4\sqrt{2\alpha}} [F(x) - G_1(x) + G_2(x)], \quad (47)$$

kde

$$F(x) = \ln \left(\frac{x^2 + \alpha - \sqrt{2\alpha}x}{x^2 + \alpha + \sqrt{2\alpha}x} \right) \quad (48)$$

$$G_1(x) = 2 \arctan \left(1 + \sqrt{\frac{2}{\alpha}} x \right) \quad (49)$$

$$G_2(x) = 2 \arctan \left(1 - \sqrt{\frac{2}{\alpha}} x \right). \quad (50)$$

Teraz vyhodnotíme primitívnu funkciu (47).

Vidíme, že $P(0) = 0$ pretože funkcia F má nulovú hodnotu a G_1 a G_2 sa odčítajú na nulu.

Pre $P(1)$ môžeme urobiť nasledovnú aproximáciu. Stále sme v oblasti v okolí Fermiho energie, teda $\epsilon \ll 1$ a taktiež $\alpha \ll 1$. Môžeme preto predpokladať $F(1) = 0$. Zostáva teda vyčíslieť funkcie G_1 a G_2 . Tie môžeme pre α idúce do nuly napísať ako $G_1 = 2\pi$ a $G_2 = -2\pi$. Z toho dostávame

$$P(1) = \frac{1}{2\pi^2 \epsilon_0 q_0 \rho_0} \frac{1}{4\sqrt{2\alpha}} 4\pi \quad (51)$$

Po aritmetických úpravách a dosadeniach dostávame.

$$\frac{dE_{self}(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{\hbar D\epsilon}} \quad (52)$$

Znova dosadíme do (28) a dostaneme

$$\rho_1(E) = \rho_{01} \left[1 - \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{\hbar D|E - E_F|}} \right] \quad (53)$$

2 Experimentálne meranie ustoty stavov v disorderovanom kove

V tejto kapitole predstavíme experimentálnu metódu merania hustoty stavov. Táto metóda využíva efekt tunelovania elektrónu cez potenciálovú bariéru.

Experimentálna sústava pozostáva z dvoch kovov odelených izolantom. Naľavo máme čistý kov, ktorého hustotu poznáme - *známy kov*. Napravo máme disorderovaný kov, ktorého hustotu stavov budeme merať - *skúmaný kov*. Izolant tvorí potenciálovú bariéru. Na sústavu priložíme napätie U a budeme merať prúd.

Bez priloženého napätia ($U = 0$) popisuje Hamiltonián

$$\hat{H} = \frac{\hbar^2 \Delta}{2m} + V(x), \quad (54)$$

kde

$$V(x) = \begin{cases} V_0, & \text{pre } 0 < x < b \\ 0, & \text{inak} \end{cases}, \quad (55)$$

kde b je šírka bariéry,

Hľadanie vlastných stavov Hamiltoniánu (54) je učebnicový problém, ktorý sa štandardne rieši nájdením vlnových funkcií v troch oblastiach a následným „zošíváním” pomocou podmienky spojitosti vlnovej funkcie a jej derivácie.

Štandardný spôsob riešenia však zlyhá po priložení napätia na experimentálnu sústavu. Preto predstavíme iný spôsob.

Majme teraz dve nekonečne široké bariéry z ľava:

$$V_l(x) = \begin{cases} V_0, & \text{pre } 0 < x \\ 0, & \text{inak} \end{cases}, \quad (56)$$

a podobne sprava

$$V_r(x) = \begin{cases} V_0, & \text{pre } b > x \\ 0, & \text{inak} \end{cases}. \quad (57)$$

Pre obe bariéry (56) a (57) vieme určiť vlastné stavy $\psi_l(x)$ a $\psi_r(x)$. Tieto stavy sú očividne dobrou aproximáciou stavov naľavo a napravo od konečnej bariéry (55). Nie sú to však vlastné stavy hamiltoniánu (54), preto musíme riešiť časovú SchR

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi(x, t) = \hat{H} \psi(x, t). \quad (58)$$

Časticu je v čase $t = 0$ na ľavo od bariéry teda v stave $\psi_l(x)$, teda máme počiatočnú podmienku

$$\psi(x, 0) = \psi_l(x). \quad (59)$$

Riešenie časovej SchR (58) hľadáme v tvare:

$$\psi(x, t) = c_l(t) \psi_l(x) e^{-\frac{iE_l t}{\hbar}} + \sum_{\forall r} c_r(t) \psi_r(x) e^{-\frac{iE_r t}{\hbar}}, \quad (60)$$

kde s počiatočných podmienok (59) dostávame:

$$c_l(0) = 1, c_r(0) = 0. \quad (61)$$

Pre slabo preniknuteľnú bariéru vieme koeficienty aproximovať ako:

$$c_l(t) \doteq 1, c'_l(t) \doteq 1, c_r(t) \doteq 0. \quad (62)$$

Dosadením (60) do (58) a použitím (62) a následnými úpravami dostávame

$$w_{r \rightarrow l} = \frac{2\pi}{\hbar} < \psi_l | H - E_l | \psi_r > \delta(E_l - E_r). \quad (63)$$

Dostali sme vzťah podobný Fermiho zlatému pravidlu, ktorý popisuje pravdepodobnosť prechod zo stavu ψ_l do stavu ψ_r .

V ďalšom zavedieme označenie

$$t_{k_l \rightarrow k_r} = < \psi_l | H - E_l | \psi_r > \quad (64)$$

Teraz priložíme na sústavu napätie U , čo spôsobí zmenu dna energetického pásu na pravej strane bariéry ΔE_c . Potenciálová bariéra má teraz tvar lineárnej funkcie. Obsadzovacie čísla jednotlivých elektrónových stavov budú na ľavo dané Fermi-Diracovým rozdelením:

$$f_l(k_l) = \frac{1}{e^{\frac{E_{k_l} - \mu_l}{k_b T}} + 1}, \quad (65)$$

podobne pre stavy na pravo:

$$f_r(k_r) = \frac{1}{e^{\frac{E_{k_r} - \mu_r}{k_b T}} + 1}. \quad (66)$$

Počet elektrónov ktoré prejdú zľava do prava, resp sprava do ľava.

$$\Gamma^+(\Delta E) = \sum_{k_l} \sum_{k_r} w_{k_l \rightarrow k_r} f_l(k_l) [1 - f_r(k_r)] \quad (67)$$

$$\Gamma^-(\Delta E) = \sum_{k_l} \sum_{k_r} w_{k_r \rightarrow k_l} f_r(k_r) [1 - f_l(k_l)] \quad (68)$$

Kde ΔE je rozdiel energii medzi stavmi naľavo a napravo, pozri obrázok. Celkový prúd je teda

$$I = \Gamma^+(\Delta E) - \Gamma^-(\Delta E) \quad (69)$$

V roviniciach (67) a (68) prejdeme od sumy k integrálu a dosadíme Zlaté pravidlo (63). Nakoniec prejdeme k integrálu cez energiu, kde musíme násobiť hustotu stavov.

$$\begin{aligned} \Gamma^+(\Delta E) &= \frac{2\pi}{\hbar} 2 \sum_{k_l} \sum_{k_r} |t_{k_l \rightarrow k_r}|^2 f_l(k_l) [1 - f_r(k_r)] \delta(E_l - E_r) = \\ &= \frac{2\pi}{\hbar} 2 \int_0^\infty \frac{L}{\pi} dk_r \int_0^\infty \frac{L}{\pi} dl_l |t_{k_l \rightarrow k_r}|^2 f_l(k_l) [1 - f_r(k_r)] \delta(E_l - E_r) \simeq \\ &= \frac{2\pi}{\hbar} 2 |t|^2 \int_{E_{c,l}}^\infty \frac{L}{\pi} \rho_r(E_r) dE_r \int_{E_{c,r}}^\infty \frac{L}{\pi} N_r(E_r) dE_r f_l(k_l) [1 - f_r(k_r)] \delta(E_l - E_r), \end{aligned}$$

kde sme v poslednom riadku zanedbali závislosť transmisného koeficientu $t(k_l, k_r)$. Podobným spôsobom vieme upraviť aj vzťah (68). Takto upravené vzťahy dosadíme do rovnice pre celkový prúd prechádzajúci sústavou (69) a dostaneme

$$I = e \frac{4\pi |t|^2}{\hbar} \int_{E_{cl}}^\infty dE_l \rho_l(E_l) \rho_r(E_l) (f_l(E_l) - f_r(E_l)), \quad (70)$$

kde sme navyše využili δ -funkciu a zbavili sa integrovania cez E_r .

V limite nízkych teplôt $T \simeq 0$ Fermi-Diracove funkcie prejdú na Θ -funkcie. Preto dostávame

3 Odvodenie Kubovej Formuly

V tejto kapitole odvodíme Kubovu Formulu pre optickú vodivosť, ktorú neskôr použijeme na ďalšie výpočty. Narozdiel od štandardne používanej Boltzmanovej Kinetickej rovnice (BKR), ktorá využíva semiklasický formalizmus vlnových balíkov, v Kubovej formule uvažujeme čisto kvantový prístup. V tejto kapitole ukážeme, že v istom priblížení výsledok pre vodivosť z Kubovej formuly korešponduje s Drudeho formulou:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*}, \quad (71)$$

kde n je číslo pásu, τ je relaxačný čas a m^* je efektívna hmotnosť. Drudeho formula je odvodená z BKR, teda je semiklasická, z Kubovej formuly vieme dostať jej kvantovú analógiu. Uvažujme disorderovaný kov napojený na zdroj napätia s periodickou časovou závislosťou

$$V(t) = V \cos \omega t = -eEx \cos \omega t. \quad (72)$$

Predpokladajme, že v čase $t = t_0$ je pole nulové. Platí bezčasová Schrödingerova Rovnica

$$\hat{H}\phi_j(\vec{r}) = \epsilon_j\phi_j(\vec{r}), \quad (73)$$

ktorej Hamiltonián

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\vec{r} + V_{dis}(\vec{r}), \quad (74)$$

kde $V_{dis}(\vec{r})$ je náhodný potenciál disorderu. Pre vlnovú funkciu $\Psi(\vec{r}, t)$ v iných časoch platí.

$$\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{r}, t) = (\hat{H} + V(t))\Psi(\vec{r}, t). \quad (75)$$

Rovnicu (75) riešime pomocou časovej poruchovej teórie. Funkciu $\Psi(\vec{r}, t)$ rozviníme do stacionárnych stavov $\phi_j(\vec{r})$.

$$\Psi(\vec{r}, t) = \sum_j c_{ji}(t)\phi_j(\vec{r})e^{-\frac{i\epsilon_j}{\hbar}t}, \quad (76)$$

kde $c_{ji}(t)$ je koeficient prechodu, pre násobením komplexne združeným $c_{ji}^*(t)$ dostaneme pravdepodobnosť prechodu $|c_{ji}(t)|^2$ z počiatočného stavu i do nového stavu j . Je zrejmé,

že v čase $t = t_0$ je tento koeficient rovný Kronekerovmu symbolu

$$c_{ji}(t_0) = \delta_{ji} \quad (77)$$

V ďalších výpočtoch budeme potrebovať koeficient prechodu medzi počiatočným stavom i a finálnym stavom f . Ten dostaneme nasledovným spôsobom:

Rozvoj (76) dosadíme do (75) obe strany prenásobíme $\phi_f(\vec{r})e^{\frac{i\epsilon_f t}{\hbar}}$ - kde $\phi_f(\vec{r})$ a ϵ_f sú vlnová funkcia a energia finálneho stavu f - a integrujeme cez normovaný objem Ω . Rovnica (75) prejde na

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} c_{fi}(t) = \sum_j c_{ji} V_{fi}(t) e^{\frac{-i\epsilon_{fi} t}{\hbar}}, \quad (78)$$

kde sme zaviedli nasledovné označenia:

$$V_{fi}(t) \equiv \int_{\Omega} d\vec{r} \phi_f(\vec{r}) V(t) \phi_i(\vec{r}) \quad (79)$$

$$\epsilon_{fi} \equiv \epsilon_f - \epsilon_i. \quad (80)$$

Teraz použijeme Bornovu aproximáciu $c_{ij}(t) = ij(t_0)$, čo je podľa (77) Kronekerov symbol, teda (78) prejde na

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} c_{fi}(t) = V_{fi} e^{\frac{-i\epsilon_{fi} t}{\hbar}}. \quad (81)$$

Túto diferenciálnu rovnicu vieme narozdiel od (75) a (78) riešiť jednoducho integrovaním:

$$c_{fi}(t) = \frac{1}{i\hbar} \int_0^t dt' V_{fi}(t') e^{\frac{-i\epsilon_{fi} t'}{\hbar}} \quad (82)$$

Záver

Záver

Zoznam použitej literatúry

- [1] B. L. Altshuler and A. G. Aronov, “Electron-electron interactions in disordered systems,” p. 1, Elsevier, 1985.