

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Současný stav teorie polovodičů

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 5-6, 594--598

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137364>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

jen málo, aby se dosáhlo rovnovážné teploty reakce ($T - D$ v) pozemských měřících, zejména, vezmeme-li ještě v úvahu, že Boltzmannův-Stefanův zákon tu může vést dokonce řádově k nesprávným hodnotám. Počet vzniklých částic s maximální energií může být právě nukleární reakcí experimentálně snadno kontrolován.

Podobných, velmi silných klasických koncentrací energie lze dosáhnout na př. pomocí fokusovaných detonačních vln [3].

I když tyto metody nevedou přímo k nějakému významnějšímu přebytku energie, lze jimi dosáhnout takové ionisace plynného terče, že dolet urychlované částice v něm silně vzrůstá. Takto může eventuálně impulsové pracující urychlovač dodat plynnému terči, ionisovanému synchronisovanými impulsy, využitelný přebytek energie.

Každá metoda, která vede ke zvětšení doletu, podporuje přirozeně uvolňování dodatkové energie. K zvětšení průměrného doletu jednotlivé částice může snad vést také, je-li urychlovač napájen velkým proudem.

Praktické využití atomové energie kontrolovatelnou reakcí splývání jader je možná věcí daleké budoucnosti. Přesto může studium této otázky přinést užitek okamžitě tím, že povede k formulaci a řešení mnoha fyzikálních problémů, které jsou samy o sobě zajímavé.

Děkuji na tomto místě kolegům, kteří se zúčastnili debat o tomto problému, především pak G. Kálmánovi, jehož poznámky jsem využil.

Literatura

- [1] F. E. O'Meara, Phys. Rev., sv. 89, 982, 1953.
- [2] W. R. Arnold et alii, Phys. Rev., sv. 93, 483, 1954.
- [3] J. Thibaud et D. Perrier, Nuovo Cimento, sv. 8, 705, 1951.
- [4] H. Thirring, Nucleonics, sv. 13, 62, 1955.

Přeložil dr. Josef Veselka.

SOUČASNÝ STAV THEORIE POLOVODIČŮ

Tato stat je výtahem z referátu S. I. Pekara, který byl přednesen na Vsesvazové konferenci o polovodičích, konané v Leningradě v únoru 1955.¹⁾ Týká se především jevů fotoelektrických a optických v polovodičích. Výtah obsahuje pět částí: 1. Fenomenologická teorie — 2. Kinetická teorie — 3. Teorie tepelných přechodů — 4. Teorie fotopřechodů — 5. Methoda stacionárních stavů.

I

Fenomenologická teorie polovodičů vychází z rovnice elektrické vodivosti, Poissonovy rovnice, difuze, exponencionální závislosti koncentrace nosičů v závislosti na teplotě a na mnoha jiných parametrech. Všechny závěry, vyplývající z fenomenologické teorie, pokládají za výchozí stav stav rovnovážný. Na základě této teorie a závěrů z ní plynoucích byla vybudována teorie plošných usměrňovačů, $p-n$ přechodů, povrchových stavů, teorie kontaktu kov-polovodič atd.

Tyto efekty se podařilo celkem snadno a jasně vyložit fenomenologickou teorií, avšak při dalších výzkumech a theoretických pracích se přišlo na některé nedostatky, které brání přesnému výkladu. Základním nedostatkem fenomenologické teorie je to, že zavádí velký počet vstupních parametrů, které nemohou být určeny cestou srovnání

¹⁾ S. I. Pekar, *Sostojanije nekotorych voprosov teorii poluprovodnikov i dielektrikov i puti dalnejšego razvitiija teorii*, ŽTF, sv. XXV, č. 12, 1955.

theorie s experimentem. Uvedme některé nejdůležitější parametry, se kterými se setkáváme skoro ve všech rovnicích, popisujících chování polovodičů. Jsou to: 1. Pohyblivost děr a elektronů, 2. koeficient difuze, 3. efektivní massa, 4. koncentrace a energie lokálních stavů elektronů v polovodičích, 5. tepelné závislosti a závislosti týkající se přeskočení elektronů vlivem teploty, 6. pravděpodobnost vzniku nosičů vlivem dopadajícího světelného a korpuskulárního záření atd.

Výzkumem těchto parametrů se zabývá mikrotheorie polovodičů, která je teprve v počátcích. Jak zmíněno, fenomenologická teorie zavádí mnoho vstupních parametrů. Z toho plyne i značná přibližnost vzorců a vztahů.

Druhým základním nedostatkem fenomenologické teorie je naprosté ignorování neideálnosti předmětů. Na př. v teorii kontaktu kov-polovodič se považují oba povrchy za dokonale rovné a hladké plochy. Zapomíná se na polykrystalickou strukturu povrchu polovodiče atd.

Současná fenomenologická teorie polovodičů není přesně kvantitativní a dosud se stále vyvíjí. Její přesnost bude růst tak rychle, jak rychle se stanou známými její parametry. A právě k objasnění těchto parametrů je třeba dalšího rozvoje dosud mladé mikrotheorie polovodičů.

Další propracovávání fenomenologické teorie by se mělo hlavně soustředit na

A. konstrukci přístrojů s polovodičovými elementy, na určení hranic možnosti využití polovodičů a na vymezení cesty dalšího zdokonalení těchto přístrojů,

B. na doplnění fenomenologické teorie zkoumáním excitovaných stavů,

C. na zobecnění fenomenologické teorie pro případ silných elektrických polí a proudů, které způsobují porušení tepelné rovnováhy elektronů v zóně vodivosti, růst jejich střední tepelné energie a ionisaci atomů, na aplikace této teorie na řešení $p-n$ přechodů, pro které neplatí přesně Ohmův zákon a rovnice vodivosti,

D. na doplnění úloh vodivosti a difuze nosičů proudu úlohami tepelné vodivosti.

II

Kinetická teorie elektronů ve vodivostní zóně polovodiče se snaží o vysvětlení jejich pohyblivosti, koeficientu difuze, Hallova efektu, tepelné vodivosti elektronů atd. Tato teorie je pro mnohé případy dosud nevyhovující. V některých případech dostaneme výsledky, jež jsou v soulase s experimentem, a v jiných se experiment od theoretického výsledku hodně liší. Oblast využití kinetické rovnice a předpokladu pro ni je dosud málo probádána a často se stává, že jí používáme tam, kde již neplatí.

Methoda kinetické rovnice vychází z představy srážek mezi nosiči proudu a mřížkou krystalu. Tato představa byla správná v době Boltzmannově a Lorentzově, avšak musí být znovu ověřena v souvislosti s vlnovou mechanikou. V poslední době se ukázalo, že pojem hodnoty energie nosičů proudu není přesný. Nepřesnost v hodnotě energie

je určena vztahem $\Delta E > \frac{\hbar}{\tau}$, kde τ je doba průletu volné dráhy elektronu. Střední dobu průletu $\bar{\tau}$ lze spojit s pohyblivostí nosičů proudu vztahem

$$u = \frac{e}{M} \bar{\tau}, \quad (1)$$

kde M je efektivní massa nosiče proudu. Pomocí tohoto vztahu lze definovat

$$\Delta E > \frac{\hbar e}{Mu}. \quad (2)$$

Položíme-li M rovno masse volného elektronu a $u = 50 \text{ cm}^2/\text{V. sec.}$, pak $\Delta E = 0,023 \text{ eV}$.

Z tohoto výsledku je vidět, že nepřesnost určení energie je větší než hodnota tepelné energie nosičů proudu při pokojové teplotě. Za těchto podmínek ovšem ztrácí smysl použití kinetické rovnice.

Druhým výchozím bodem kinetické teorie vedle srážek je představa nosiče proudu, jeho energie a vzájemného působení s elektrickými kmity mřížky krystalu. Tyto představy určují pravděpodobnost srážek nosičů s mřížkou, určení doby průletu a délky volné dráhy elektronu atd. Vzájemným působením elektronů a kmitáním mřížky se tvoří polaron, který se pohybuje v krystalu se směrem elektrického pole, tedy i proudu nosičů. Při pohybu polaronu v krystalu se rozptýlí jen malá část jeho energie. Proto je volná dráha polaronu \bar{v} mnohem větší než volná dráha elektronu ve vodivostní zóně. V souhlase s tím je pak i efektivní hmota polaronu M větší než masa elektronu μ . Jelikož vztah (1) platí jak pro polarony, tak pro elektrony, bude pro krystal s danou pohyblivostí u neurčitost energie ΔE , pro polaron pak $\frac{M}{\mu}$ krát menší než pro elektron, a oblast využití kinetické rovnice bude tedy pro polarony daleko širší.

Tak jako ve stati o fenomenologické teorii, i zde je vidět, že pro určení jevů, probíhajících v polovodičích, je nezbytně nutno dále rozvíjet mikroteorii polovodičů. Na první pohled se zdá, že tvrzení, vyplývající z kinetické rovnice, jsou paradoxní, ale ve skutečnosti jsou jen obrazem obecného stavu kvantové mechaniky.

Další propracovávání kinetické teorie polovodičů by se mělo soustředit hlavně na

A. vypracování metody určení ψ funkce ze Schrödingerovy rovnice pro nestacionární stavy za přítomnosti vnějšího elektrického pole a vyjádření proudu ve tvaru

$$I = i \frac{e \hbar}{2m} [\psi \nabla \psi^* - \psi^* \nabla \psi]. \quad (3)$$

Vyřešení této úlohy by pozvedlo teorii polovodičů na mnohem vyšší úroveň,

B. na zavedení nových přesných pojmů pro nosiče proudu do kinetiky, přesných pojmů pro jejich energii, pravděpodobnost srážek atd.,

C. na kritickou analýsu teorie pohyblivosti, difuze, termoelektrické síly, Hallova efektu atd., dále na prověření zjednodušujících předpokladů a na odmítnutí teorií, založených na nesprávných předpokladech.

III

Teorie tepelných přechodů elektronů v polovodičích je nutná pro určení tak důležitých veličin, jakými jsou pravděpodobnost rekombinace nosičů proudu, pravděpodobnost jejich přeskoků z lokálních hladin do vodivostní zony, kvantový výklad vnitřního fotoefektu a jeho tepelné závislosti atd. Tato teorie je jednou z nejobtížnějších a nejméně propracovaných partií polovodičů.

Z theoretických výkladů se ukazuje, že první přiblížení pro přechod elektronů je dáno změnou kvanta energie $\hbar \omega_x$, druhé přiblížení se změnou dvou $\hbar \omega_x$ atd.

Tepelné přechody elektronu se zkoumají na více méně pravděpodobných základech. Předpokládá se, že stav elektronu adiabaticky sleduje pohyb atomu; příčinou přechodu je potom neadiabatický člen, jehož přítomnost se předpokládá. Nedostatkem teorie tepelných přechodů jsou velká zjednodušení, týkající se modelu lokálního elektronového centra (elektron se uvažuje uprostřed pravoúhlé potenciální jámy), neopodstatněné změny vlivu kmitů iontů na elektron zavedením ekvivalentního homogenního elektrického pole, přehlížení změny rovnovážných stavů atomu při přechodu elektronu atd.

Všechny teorie, týkající se tepelných přechodů elektronů, jsou vybudovány na základě předpokladu adiabatického přiblížení a mohou být použity jen při přechodech elektronů mezi diskrétními elektrickými hladinami.

Další propracovávání teorie tepelných přechodů by se mělo soustředit hlavně na
A. srovnání experimentů se současnou teorií tepelných přechodů a na objasnění jejich přesnosti a hranic využití,

B. na zobecnění teorie a aplikaci na nové případy, hlavně na vypracování method teorie přechodu elektronů,

C. na zavedení elementů, převzatých z mikrotheorie elektronových stavů do obecné teorie tepelných přechodů,

D. na využití výsledků teorie tepelných přechodů ve fenomenologické teorii polovodičů.

IV

Theorie fotopřechodů elektronů v ideálním krystalu je stará asi 30 let a vycházela ze všeobecně používané pásmové teorie. Avšak i tato teorie jeví nedostatky při vysvětlení spekter a pohltivosti světla. Hlavními nedostatky této teorie jsou: 1. prakticky nemožný výpočet vlnových funkcí elektronu v periodickém poli krystalu a určení hustoty hladin energie v dovolených pásmech, 2. složitý charakter excitace elektronu, který nemůže být interpretován pomocí pásmové teorie.

Dále se zmíníme o vzniku excitonů, jejichž teorie se ubírá dvěma směry.

První předpokládá, že energetická spektra a vlnové funkce elektronů, ze kterých se krystal skládá, jsou známy. Vlnová funkce soustavy se pak určuje jako součin atomových vlnových funkcí. Uvedené předpoklady jsou správné tehdy, je-li vzájemné působení mezi atomy krystalů velmi malé. Tato teorie se hodí velmi dobře pro molekulové krystaly, avšak ne již pro polovodiče.

Druhý směr v teorii excitonů se ubírá cestou, která předpokládá současný pohyb díry a elektronu. Tomuto páru nosičů se připisuje určitá efektivní massa a zanedbává se vliv prostorové periodičnosti potenciálu v krystalu. Uvedené předpoklady jsou celkem správné a jsou potvrzeny experimentem.

Závěrem se dá říci, že není dobré používat pásmové teorie k výkladu fotopřechodu elektronů, ale že je daleko lepší soustředit se na teorii excitonů a pomocí nich vykládat fotopřechody. Teorie fotopřechodu elektronů se poněkud zjednoduší, použijeme-li předpokladů a závěrů, plynoucích z odst. III. Také teorie fotopřechodů se dosud vyvíjí a nedají se z ní dělat konečné závěry.

Další propracovávání teorie fotopřechodů by se mělo soustředit hlavně na

A. rozšíření teorie kvantových stavů soustavy na teorii fotopřechodů,

B. na přesné řešení pole uvnitř krystalu, na teorii vnitřního fotoefektu a na vztah pro pravděpodobnost fotopřechodu elektronu,

C. na kmity mřížky v krystalu ve vztahu k fotopřechodu,

D. na další rozšíření teorie pohltivosti světla, luminiscence atd. na podkladě adiabatického přiblížení.

V

Methoda kvantových stacionárních stavů se zabývá především výpočtem stacionárních vlnových funkcí soustavy a hodnot energií elektronů a parametrů, které jsou důležité pro jevy foto- a termopřechodů. Kvantová teorie stacionárních stavů je jedna ze základních teorií polovodičů, její nevýhodou je však množství vstupních parametrů, které se nedají přesně určit, podobně jako je tomu u fenomenologické teorie.

a) Stav nosičů proudu a excitonů:

Pásmová teorie elektronů v krystalu je založená na těchto dvou zjednodušujících předpokladech:

1. úloha týkající se vyšetřování chování elektronů v polovodiči se redukuje na vyšetřování stavu toliko jednoho elektronu,

2. zanedbává se vzájemné působení elektronů s tepelnými kmity atomové mřížky. Z theoretických prací Foka a Pekara se ukázalo, že oba tyto předpoklady dobře vyhovují, pokud se aplikují na dielektrika, ale v aplikacích na polovodiče jsou v současné době nepřijatelné.

Propracovávání této teorie by se mělo soustředit hlavně

- A. na metody řešení úloh s více elektrony,
- B. na rozšíření teorie elektronů v periodickém poli a na vypracování přibližných method v teorii polaronu,
- C. na obecnou teorii polaronu, na určení tak zvané polaronové zony a na zkoumání jevů v polovodičích, je-li rychlost polaronu rovna rychlosti zvuku,
- D. na rozšíření teorie excitonu a kvasicástic.

b) Stavby poruchových center elektronů:

Propracovávání by se mělo soustředit hlavně na

- A. rozvíjení teorie částic o velkých poloměrech a na formulaci rovnic jejich pohybu v krystalu, na poruchová centra atd.,
- B. na excitované a ionisované stavy center vlivem nárazu nosičů proudu, excitonu, korpuskulárního a světelného záření,
- C. na rozšíření teorie resonance spinu elektronu v lokálních poruchových centrech.

Jiří Kodeš.

RADIOTELEMETRIE

Radiotelemetrie je odvětví radiotechniky, zabývající se měřením různých technických, fyzikálních a jiných veličin na dálku pomocí radiových vln. V poslední době se method měření různých veličin na dálku pomocí radiových vln stále více používá. Výhodou těchto method je, že na kontrolovaném objektu se umístí pouze přenosné měřicí zařízení a ostatní objemná a těžkopádná aparatura je trvale instalována na kontrolním stanovišti.

Při měření na dálku se měřené veličiny přemění na elektrické signály, které se radiem přenášejí do registračního zařízení. Přístroje a zařízení, jejichž pomocí se přenášejí výsledky měření, tvoří radiotelemetrickou soustavu. Základem každé radiotelemetrické soustavy je vysílací a přijímací zařízení.

Měřené veličiny se pomocí čidel přemění v elektrické signály, které procházejí šifrovacím zařízením. Měří-li se současně několik veličin, vzniká v šifrovacím zařízení stejný počet vzájemně odlišných napětí, při čemž každé vyjadřuje charakter jedné měřené veličiny. Rozlišovacím parametrem jednotlivých napětí může být na příklad frekvence sinusových kmitů, délka impulsů atd. Napětí získaná v šifrovacím zařízení moduluje signál vysílače radiových vln. V přijímacím zařízení na kontrolním stanovišti prochází zachycený signál dešifrovacím zařízením. Úkolem dešifrovacího zařízení je oddělit složky signálu, příslušné jednotlivým měřeným veličinám. Každý dílčí signál se vede kanálem do registračního zařízení pro zápis nebo pro vizuální pozorování.

Aby bylo možno uskutečnit současně přenos několika různorodých signálů na téže nosné frekvenci, je nutno použít radiových linek s více kanály. V praxi se používá linek s kanály oddělenými frekvenčně nebo časově.

Při frekvenčním oddělení kanálů se měřené veličiny mění v elektrické signály různých frekvencí, nazývaných zdvihové frekvence. Napětími, která vznikají