

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Miloš Matyáš

Radiační poruchy v pevných látkách

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 8 (1963), No. 4, 210--215

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138285>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1963

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>

není zapotřebí konstruovat explicitně algoritmus, nýbrž stačí konstatovat vyčíslitelnost příslušné funkce). Tak základní pojmy, jako pojmy rekurzivně spočetné a rozhodnutelné množiny, mohou být definovány na základě pojmu vyčíslitelné funkce (aniž saháme k pojmu algoritmu). Rozumí se ovšem, že konec konců cena vyčíslitelných funkcí záleží právě v tom, že pro každou z nich lze ukázat algoritmus, který ji vyčísluje.

V současné době se vyčíslitelné funkce s přirozenými čísly jako argumenty a hodnotami ztotožňují s tzv. *částecně rekurzivními* funkcemi, jež lze exaktně matematicky definovat.

Literatura

ADJAN S. I.: Problema algoritma. Nauka i žizň 1957, No, 8, str. 13.

KOLMOGOROV A. N. i USPENSKIJ V. A.: K opreděleniju algorifma. Uspechi matěmatičeskich nauk 13, 3 (1958).

MARKOV A. A.: Těoriija algorifmov. Trudy Matěmatičeskogo instituta AN SSSR 38, 176 (1951).

MARKOV A. A.: Těoriija algorifmov, tamtěž 42 (1954).

PETER R.: *Rekursivnyje funkcii* (překl. z němčiny). Moskva 1954 (§ 20, 21).

TRACHTĚNBROT B. A.: Algorifmy i mašinnoje rešenije zadač. Moskva 1957, 2. vyd. (Český překlad NČSAV, 1963.)

ŠANIN N. A.: O někotorych logičeskich problemach arifmetiki. Trudy Mat. instituta AN SSSR 43 (1955) (úvod, § 1, § 4, § 5—6).

Přeložil *Pavel Materna*

RADIAČNÍ PORUCHY V PEVNÝCH LÁTKÁCH

MILOŠ MATYÁŠ, Praha

Již v roce 1942 vyslovil WIGNER doměnkou, že záření vznikající v reaktorech nebo v urychlovačích částic může porušit krystalickou mřížku použitých materiálů. Odůvodňoval to tím, že toto záření má vysokou energii, ať již jde o částice nebo o elektromagnetické rozruchy. Dnes označujeme mřížkové poruchy, které vznikají v krystalu účinkem energeticky bohatého záření, jako radiační poruchy. Pod pojmem energeticky bohaté záření rozumíme takové záření, jehož jednotlivé částice nebo kvanta mají energii minimálně 10^4 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Ws = $1,6 \cdot 10^{-12}$ erg. Přivedeme-li tuto energii tělesu makroskopických rozměrů, např. 1 cm^3 vody, nestane se nic; změna jeho teploty bude prakticky nezměřitelná. Avšak zcela jiná situace nastane při elementárním procesu, kdy např. neutron dopadající s touto energií na krystal, přijde do styku s jednotlivými atomy. V tomto případě lze očekávat, že mohou nastat změny v mřížce krystalu. Tento předpoklad se ukáže ještě pravděpodobnějším, srovnáme-li energii dopadající částice s vazebnou energií krystalu, která přepočtena na 1 atom činí několik eV.

V dalších odstavcích se budeme zabývat výhradně korpuskulárním zářením a typy radiačních poruch, které může toto záření vyvolat v krystalové mřížce.

ENERGETICKÉ ZTRÁTY DOPADAJÍCÍHO ZÁŘENÍ V KRYSTALECH

Dopadají-li na krystal energeticky bohaté částice, např. elektrony, protony, deutery, částice α nebo těžké ionty, ztrácejí svou energii při pružných i nepružných srážkách. Při pružných srážkách se zvyšuje kinetická energie atomů mřížky, při nepružných srážkách dochází k vybuzení atomu, k jeho ionizaci apod. Energetické ztráty při pružných a nepružných srážkách jsou v poměru asi 1 : 1000, což tedy znamená, že téměř všechna energie dopadající částice se spotřebuje na vybuzení atomu, popř. k jeho ionizaci, a že jen nepatrná část energie se ztrácí při pružných srážkách, které vedou, jak uvidíme, k radiačním poruchám. Uvažujme však nejprve energetické ztráty jednotlivých částic při průchodu krystalem.

Velmi rychlé částice ztrácejí svou energii především nepružnými srážkami. Jejich energie tedy postupně klesá. Počínaje však od určité energie E_0 začínají se uplatňovat s převahou pružné srážky. Hrubý odhad této energie u nevodičů je dán vztahem

$$(1) \quad E_0 \approx \frac{1}{10} \frac{m}{M} A,$$

kde m je hmota elektronu, M hmota dopadající částice a A energie nutná k vybuzení atomu do energetického stavu nejbližšího základnímu. Dosadíme-li $A \approx 5eV$ a za m klidovou hmotu elektronu, obdržíme

$$(2) \quad E_0 \approx 10^3 M \text{ (eV)}.$$

Podobnou úvahou obdržíme stejný výsledek i pro kovy. Pomocí tohoto přibližného vztahu lze pak odhadnout energii E_0 pro některé částice. U protonů se začínají uplatňovat pružné srážky při energiích $1 \cdot 10^3$ eV a nižších. U deuteronů je tato hranice u $2 \cdot 10^3$ eV, u částic α u $4 \cdot 10^3$ eV. Tyto výsledky tedy ukazují, že částice s vysokou energií ztrácejí většinu své energie nepružnými srážkami. Ovšem čím těžší je dopadající částice, tím větší je podíl její celkové energie, který připadá na pružné srážky.

Rychlé neutrony nenesou žádný náboj a ztrácejí svou energii jen pružnými srážkami s jádry atomů mřížky. Tím je zasaženému atomu předávána veliká kinetická energie, atom je vyražen ze své mřížkové polohy a během svého pohybu ztrácí tuto energii opět pružnými a nepružnými srážkami.

Pomalé neutrony jsou však snadno zachyceny jádry atomů mřížky; přitom dochází k jaderné přeměně, při které se uvolní energie ve formě energeticky bohatého záření, zpravidla kvant γ . Toto záření vyvolává v krystalu fotoelektrický nebo Comptonův jev. Zachycení pomalých neutronů jádry vede ke kvalitativní změně příslušného atomu. Počet těchto přeměn není však velký a je bez podstatného vlivu na makroskopické vlastnosti. V některých případech lze však pozorovat jisté změny vlastností látek, např. u polovodičů, u kterých lze tímto způsobem dosáhnout stejných účinků, jako kdybychom je legovali příměsemi typu N nebo typu P .

HLOUBKA PRŮNIKU ČÁSTIC

Chceme-li se zabývat blíže povahou radiačních poruch v krystalech, je třeba znát tloušťku, při které je krystal pro dopadající energeticky bohaté záření transparentní. Pro odhad hloubky t průniku při ozáření krystalu elektrony s energií vyšší než 1 MeV lze použít empirického vztahu

$$(3) \quad t \approx \frac{1}{2} \frac{E}{\rho},$$

kde E je energie elektronů v MeV a ρ hustota krystalu. Např. při energii elektronů 2 MeV je u hliníku $t = 4$ mm a u mědi $t = 1$ mm. Pro umělé hmoty, jejichž hustota se pohybuje zpravidla kolem 1, je hloubka průniku elektronů řádově několik centimetrů při energiích elektronů v oboru MeV.

Těžké ionty pronikají krystaly jen s obtížemi a hloubka průniku činí zlomky milimetru. Např. pro částice α s energií 2 MeV činí řádově setiny milimetru, pro deuterony s energií 10 MeV je hloubka průniku několik desetin milimetru. Rychlé neutrony však pronikají snadno do pevných látek.

NĚKTERÉ TYPY RADIAČNÍCH PORUCH

Při působení energeticky bohatého záření na krystaly musíme rozlišovat mezi krátkodobými a trvalými jevy. Ke krátkodobým jevům lze počítat např. vybuzení luminiscence nebo elektrické vodivosti, které však současně s vyhasnutím budícího záření nebo krátce potom vymizí. Těmito jevy se nebudeme dále zabývat. Nás budou zajímat trvalé jevy, při kterých dochází k pružným srážkám.

Nejjednodušší radiační poruchou jsou Frenkelovy poruchy. Maximum energie předané při pružné srážce dopadající částice s atomem krystalové mřížky je dáno vztahem

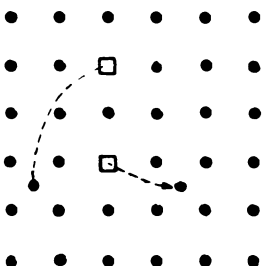
$$(4) \quad E_m = \frac{4M_1M_2E}{(M_1 + M_2)^2},$$

kde M_1 a E značí hmotu a energii dopadající částice a M_2 hmotu atomu mřížky. Je-li E_m větší než prahová energie E_d , tj. energie, která je minimálně potřebná k tomu, aby atom mřížky byl dopadající částicí vyražen ze své mřížkové polohy a zachytil se v některé intersticiální poloze, vznikne mřížková porucha. V tomto případě se vytvoří dvojice vakance a intersticiální atom. Tuto mřížkovou poruchu nazýváme Frenkelovou poruchou. Schematicky je znázorněna na obr. 1. Prahovou energii odhadl na základě teoretických úvah SEITZ a podle něho činí $E_d \approx 25$ eV. Tato hodnota byla experimentálně potvrzena např. KLONTZEM a LARK-HOROWITZEM u germania typu N , které bylo ozářeno elektrony. Tito autoři sledovali závislost elektrické vodivosti na energii dopadajících elektronů (viz obr. 2) a zjistili, že vodivost germania počínaje

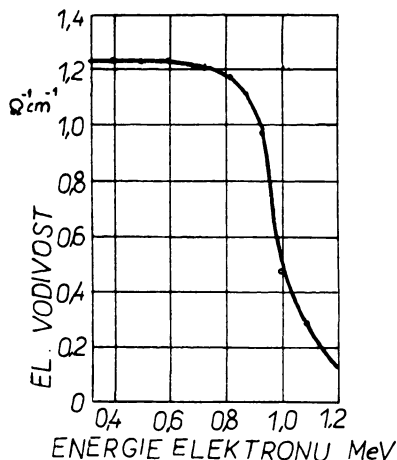
určitou energií elektronů začne velmi rychle klesat. To je snadno pochopitelné, připustíme-li, že v krystalu vznikají Frenkelovy poruchy. Poněvadž vakance se chovají v germaniu jako akceptory, vážou na sebe elektrony z donorových hladin a tím omezují počet volných elektronů. Čím větší je koncentrace vakancí, tím menší je počet elektronů uvolněných z donorových hladin a tím nižší je elektrická vodivost germania typu *N*.

Jde-li o elektrony s energiemi řádově MeV, je třeba psát rovnici (4) relativisticky, tj.

$$(5) \quad E_m = \frac{2E(E + mc^2)}{Mc^2},$$



Obr. 1. Schematické znázornění tvorby Frenkelovy poruchy.



Obr. 2. Závislost elektrické vodivosti germania typu *N* na energii dopadajících elektronů podle měření KLONTZE a LARK-HOROWITZE.

kde *E* a *m* značí energii a klidovou hmotu elektronů a *c* rychlost světla. Dosadíme-li do rovnice (5) energii elektronů, při které začínají vznikat v germaniu vakance, pak vypočtená energie *E_m* je v podstatě prahovou energií *E_d*. Z obr. 2 plyne, že *E* ≈ 0,65 MeV, takže z rovnice (5) vypočteme *E_m* ≈ *E_d* = 30 eV. Touto metodou anebo z jiných měření byly určeny hodnoty *E_d* pro vznik Frenkelových poruch u množství látek. Zjištěné hodnoty se pohybují v oboru 10 až 50 eV, což je v dobrém souhlase se Seitzovou teorií.

Při pružné srážce může převzít vyražený atom takovou část energie dopadající částice, že se sám bude pohybovat krystalem. Při srážce pak předá energii vyráženému atomu a ztratí tolik energie, že zaujme jeho místo v mřížce. Takto vzniklé poruchy vedou k tomu, že atomy různého typu si vyměňují v krystalu vzájemně své polohy. Tyto radiační poruchy mají zvláštní význam ve slitinách, neboť tímto způsobem lze v nich měnit stupeň uspořádanosti. Pokusy tohoto typu byly provedeny zvláště na slitině Cu₃Au. Kinetiku těchto radiačních poruch lze snadno sledovat ze změn elektrického odporu anebo rentgenostrukturní analýzou.

Všechny radiační poruchy nejsou však tak jednoduché jako uvedené dva typy. Velmi často je výsledkem interakce energeticky bohatého záření s krystalem velmi složitá porucha, která může obsáhnout objem krystalu s 10^3 a 10^5 atomy. Z nich uvedeme dvě, které jsou dosud experimentálně nejlépe prozkoumány.

Jestliže je atomu mřížky předána při pružné srážce energie řádově 10^2 eV, zůstává atom na svém místě. Nadbytečnou energii předává svému nejbližšímu okolí (tím rozumíme objem krystalu zahrnující $\sim 10^3$ atomů), které se krátkodobě ohřeje na vysokou teplotu ($\sim 1000^\circ\text{C}$). Při rychlém zahřátí a ochlazení vznikají v takové oblasti tepelná pnutí, u slitin se může měnit i stupeň uspořádanosti. Tuto radiační poruchu nazýváme tepelným rázem*) (v anglické fyzikální literatuře se označuje jako *thermal spike*).

Později různí autoři diskutovali o jiném typu radiační poruchy, o tzv. rázu roztažení*) (*displacement spike*). Dopadající částice se pohybuje s vysokou kinetickou energií krystalem. Volná dráha mezi dvěma po sobě jdoucími pružnými srážkami u ní postupně klesá, až konečně je řádově rovna vzdálenosti sousedních atomů v krystalu. To tedy znamená, že při průchodu každou atomovou rovinou dochází vždy k pružné srážce. Za těchto podmínek se zahřeje objem krystalu obsahující zhruba asi 10^3 až 10^5 atomů na tak vysokou teplotu, že se atomy mohou v tomto objemu pohybovat jako v tavenině. Při tuhnutí této oblasti se obvykle předpokládá, že krystalizace bude probíhat přednostně v neporušené mřížce a že mohou vznikat i menší krystalky odlišné orientace. Hranice těchto krystalků mohou být vytvářeny dislokacemi.

ZÁVĚR

Cílem studia radiačních poruch je jednak podrobně poznat povahu mřížkových poruch a jejich vliv na fyzikální vlastnosti krystalů, jednak vypracovat takové modely těchto poruch, které by dovolovaly stanovit teoreticky i experimentálně prahovou energii E_d , koncentraci poruch a jejich rozložení v objemu krystalu. Dnes existuje však jen jednoduchá teorie vypracovaná SEITZEM a KÖHLEREM, která popisuje tvorbu Frenkelových poruch při ozáření krystalu energeticky bohatými paprsky tvořenými nabitými částicemi. Že se nepodařilo dosud vypracovat obecnou teorii, má příčinu nejen v tom, že jde o mimořádně obtížný problém, nýbrž že i experimentální materiál přes svoji obsáhlost je málo upotřebitelný, neboť podmínky jednotlivých pokusů nejsou definovány a experimentální výsledky lze jen s obtížemi srovnávat. Přes všechny tyto obtíže jsou dosažené výsledky pozoruhodné a ukazují, že mohou mít veliký význam pro praktické využití. Tyto možnosti jsou patrné z tabulky sestavené SIS-MANNEM a WILSONEM, ve které jsou uvedeny účinky neutronů o různé hustotě na vlastnosti některých látek.

*) České názvy byly převzaty z článku F. KROUPY Vliv záření na vlastnosti kovů (Pokroky fyziky pevných látek sv. 4, str. 7, NČSAV, Praha 1957).

Tabulka

Hustota neutronů na 1 cm ³	Účinek
10 ¹³	Ge-tranzistor: klesá zesilovací účinek Sklo: zabarvuje se
10 ¹⁴	Pokles luminiscenčních vlastností organických látek Ge: mění se elektrické vlastnosti
10 ¹⁵	Pokles luminiscenčních vlastností anorganických látek
10 ¹⁶	Buničina: zmenšuje se pevnost v tahu Org. látky a voda: vyvíjejí se plyny
10 ¹⁷	Polyetylén: zmenšuje se pevnost v tahu Buna: měkne
10 ¹⁸	Kaučuk: tvrdne Kovy: posunuje se mez pružnosti, zpevnění Polystyrol: zmenšuje se pevnost v tahu
10 ²⁰	Keramika: snižuje se tepelná vodivost a hustota Plastické hmoty: neupotřebitelné jako stavební materiál Uhlíkatá ocel: snižuje se plasticita
10 ²¹	Nerezavějící ocel: zvyšuje se pevnost a snižuje plasticita

K hlubšímu obeznámení s touto novou fyzikální problematikou je vhodná tato monografie: G. J. DIENES, G. H. VINEYARD: *Radiation Effects in Solids* (New York 1957); ruský překlad vydalo Izd. inostrannoj literatury, Moskva 1960.

STUDIUM MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PEVNÝCH LÁTEK*)

FRANTIŠEK KROUPA, Praha

V posledních letech se dosáhlo závažného pokroku v hlubokém fyzikálním poznání podstaty mechanických neelastických vlastností pevných látek (v dalším budeme pro stručnost užívat názvu mechanické vlastnosti nebo plastická deformace). V technické praxi se dosud nejvíce využívá mechanických vlastností kovů a v souvislosti s novou perspektivou podstatného zlepšení jejich mechanických vlastností na základě hlubokého fyzikálního výzkumu se za jednu z nejvýznamnějších oblastí fyziky pevných látek pokládá fyzika kovů.

*) Z referátu předneseného na schůzi vědeckého kolegia fyziky ČSAV dne 12. 9. 1962.