

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Koc

Plazma v pevných látkách

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 12 (1967), No. 1, 1--7

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139576>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1967

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>

PLAZMA V PEVNÝCH LÁTKÁCH

STANISLAV KOC, Praha

Plazmatem nazýváme dostatečně veliký soubor elektricky nabitých částic obou znamének, z nichž alespoň jeden druh je volně pohyblivý. Soubor jako celek je elektricky neutrální. Přitom částice působí na sebe navzájem coulombovskou silou dalekého dosahu, tj. působí současně na mnoho částic. S přítomností coulombovské síly dalekého dosahu souvisí jeden důležitý jev — stínění. Vliv jakékoliv místní nábojové poruchy je odstíňován ostatními okolními náboji a potenciál klesá exponenciálně se vzdáleností. Charakteristický parametr exponenciálního zákona se označuje jako Debyeova stínící délka λ_D stejně jako v teorii silných elektrolytů, kde se setkáváme s obdobným jevem. Debyeova délka závisí na hustotě nositelů náboje n a lze ji vypočítat ze vztahu

$$\lambda_D = \left(\frac{kT}{4\pi n e^2} \right)^{1/2},$$

kde význam symbolů k , T a e je běžný (Boltzmannova konstanta, absolutní teplota a elementární náboj elektronu). Velikost veličiny λ_D nás informuje o tom, zda můžeme daný soubor elektricky nabitých částic podle výše uvedené definice považovat za plazma. Klesne-li Debyeova stínící délka pod vzdálenost jednotlivých nabitých částic, nepřekročí vliv částice prakticky hranici nejbližších sousedů, částice lze považovat za nezávislé a soubor nemá vlastnosti plazmatu. V opačném případě, kdy λ_D značně přesahuje vzdálenosti mezi částicemi, je vzájemné působení jednotlivých nábojů velmi silné a místní vnější podnět se přenáší a působí na široké okolí. Chování částic lze označit jako „kolektivní“.

Uvedený pojem „plazma“ je již velmi starý a setkáváme se s ním ve všech učebnicích elementární fyziky, kde takto bývá označováno „čtvrté, nejčastěji se vyskytující skupenství“ v řadě pevná látka–kapalina–plyn–plazma. Toto řazení spolu s faktem, že se o plazmatu dosud mluvilo výlučně jen v oblasti tzv. výbojů v plynech, vede k vytváření podvědomé představy, že plazma je spojeno především s plynným prostředím, vysokými teplotami a celkem mimořádnými podmínkami.

Dnešní běžně používaný popis pevné látky, např. kovu či polovodiče, vybudovaný na představě vzájemně pevně vázané mřížky iontů prostoupené oblakem volných elektronů, je však totožný s definicí plazmatu. Navíc intenzivní studium fyziků v ob-

lasti pevných látek nashromáždilo v poslední době celou řadu jevů, jež nelze pochopit z hlediska dosavadního jednoelektronového modelu, tj. na základě jednotlivých, navzájem naprosto nezávislých nábojů. Východisko bylo nalezeno v popisu založeném na „kolektivní“ odezvě mraku elektronového plynu v pevné látce na vnější popud. Rozbor takového kolektivního pojetí obnovil význam klasické teorie plazmatu v plynech, kombinované ovšem nyní navíc kvantovými jevy a souvislostmi s elektronovou strukturou pevné látky. Výsledkem je pak bohatá paleta dalších nových jevů, jež mohou přispět a také již přispívají k našemu porozumění oběma oborům: plazmatu v plynech i teorii pevných látek.

Dříve než se pokusíme přiblížit a osvětlit si alespoň některé již částečně rozřešené otázky z této nové a složité oblasti moderní fyziky, je třeba se zmínit i o podmínkách, jež umožnily prudký rozmach studia plazmatu v pevných látkách. Je jich samozřejmě celá řada. Mezi důležité musíme však zařadit především technologii přípravy dostatečně čistých materiálů, jejíž přínos v oblasti pevných látek je vůbec zásadní a významný. Význačnou roli sehrál zde i objev generace elektromagnetických vln (bude o nich ještě podrobněji mluveno), jež mohou být v podobě pomalých vln přenášeny pevnou látkou.

Fyzici zabývající se základními problémy plazmatu vidí ve studiu plazmatu v pevných látkách možnost přístupného a nenákladného experimentování. Fantazie jde dokonce tak daleko, že se někteří pracovníci domnívají, že bude možné nahrazovat pokusy na obrovských a nákladných plazmových zařízeních prací s relativně lacinými a nepatrnými vzorky pevných látek. Podstata myšlenky vyplývá ze srovnání středních volných drah v plynných plazmatech a pevné látce. Pro teorii pevných látek představuje tento nový obor novou metodiku sledování elektronové struktury. A další zájemci – elektroničtí inženýři – doufají v možnost praktického použití v součástkách.

TYPY PLAZMATU V PEVNÝCH LÁTKÁCH

V pevných látkách existují tři typy plazmatu:

1. Nekompenzované plazma sestávající buď jen z volných, vzájemně na sebe působících elektronů, nebo jen z volných děr, které rovnoměrně prostupují jednotné pozadí iontové mřížky. Tato nepohyblivá součást plazmatu může ovlivňovat pohyblivou složku pouze svými kmity – fonony. Přenos volných nositelů náboje je za všech okolností vázán požadavkem, aby byla vždy zachována neutralita prostorového náboje volných nositelů s mřížkovými či příměšovými ionty. Tento typ plazmatu se vyskytuje pouze v pevných látkách. Jako příklad si uveďme elektrony v kovech nebo elektrony či díry v nevlastním polovodiči s vysokou koncentrací příměsí (donorů a akceptorů).

2. Kompenzované plazma vyznačující se současně přítomností stejné hustoty nositelů náboje obou polarit – elektronů i děr, přičemž oba typy nabitých částic jsou silně pohyblivé ve srovnání s prakticky nepohyblivými ionty (mříže či nečistot)

v nekompenzovaném plazmatu. Tento druh plazmatu se vyznačuje některými vlastnostmi společnými s plazmatem v plynech při samovolné ionizaci za relativně vysokých teplot. Vhodný příklad představuje vlastní (intrinsický) polovodič.

3. Nerovnovážné plazma tvořené opět v zásadě totožnými koncentracemi elektronů a děr, jež však nemusí neutralizovat náboj lokalizovaných iontů, které nejsou proto omezovány v pohybu. Tento typ je úplnou obdobou plazmatu v částečně ionizovaném plynu a setkáváme se s ním např. při vzniku nových párů elektron–díra při injekci (ať již kontaktem či optické) nebo při nárazové ionizaci.

Z klasické fyziky víme, že plynné plazma je třeba vyrobit a toto plynné plazma vlivem toho, že má značně daleko do termické rovnováhy s laboratorním okolím, snadno a rychle mizí. Hlavní problém je v jeho zachování. V pevných látkách však existuje za normálních laboratorních podmínek absolutně stabilní plazma prvních dvou rovnovážných typů a problém je tedy, co s ním. V tom je tedy také jeden z velmi důležitých rozdílů mezi plazmatem v plynu a v pevné látce. S nerovnovážným plazmatem je tomu trochu jinak, neboť tento druh je nutno jedním ze dvou způsobů – injekcí či pomocí nárazové ionizace – připravovat. Nárazová ionizace má jakousi historickou přednost, neboť první studie vlastností nerovnovážného plazmatu byly prováděny právě s její pomocí. Při postupném zvyšování elektrického pole ve zkoumaném vzorku byl pozorován při dosažení určité hodnoty (např. u InSb mezi 200 až 300 V/cm) prudký růst vodivosti a pokles Hallovy konstanty, svědčící o vzniku plazmatu. Je samozřejmé, že pokusy byly prováděny v impulsním režimu, aby bylo zamezeno ohřívání zkoumaného vzorku. Nové páry elektron–díra vznikají zde lavičkovým procesem při srážkách volných nositelů náboje, které při tak vysokém elektrickém poli mají možnost získat mezi dvěma po sobě následujícími srážkami energii dostatečnou pro ionizaci dalšího atomu pevné látky. Výhoda tohoto způsobu záleží v možnosti získat plazma s relativně vysokou hustotou volných nositelů – dosud nejvyšší vůbec realizovanou –, avšak některé další parametry jsou v podstatě nekontrolovatelné.

Daleko snáze je možno ovládat poměry při použití jevu injekce na proudových kontaktech u polovodičů, jež prakticky nikdy nejsou dokonale ohmické. Ovšem i v tomto případě se ukazuje, že tento způsob přípravy nerovnovážného plazmatu je použitelný především pro polovodiče s úzkým pásem zakázaných energií, popř. pro nárazovou ionizaci příměsí při velmi nízkých teplotách.

Vzhledem k přednostem injektovaných plazmat lze očekávat, že se v budoucnosti rozšíří využití laserů k optickému buzení vysokých hustot elektronů a děr v pevných látkách pro potřeby studia plazmatu. Když jsme se již dotkli otázky hustot plazmatu, je třeba konstatovat, že v pevných látkách se může tato veličina pohybovat v rozmezí od $10^{13}/\text{cm}^3$ u polovodičů až do $10^{22}/\text{cm}^3$ u kovů. Naproti tomu u plynů se stěží dosahuje hustot $10^{14}/\text{cm}^3$. To tedy znamená, že v novém oboru máme možnosti sledovat chování plazmatu s parametry, které se v plynech nevyskytují, a navíc nejsme vázáni dalšími okolnostmi, jako např. striktním omezením nábojové rovno-

váhy pohyblivých nositelů, současnou a zároveň řádově odlišnou pohyblivostí obou nábojových složek apod.

A nyní si všimněme hlavních rysů některých zajímavých jevů souvisejících s plazmatem v pevných látkách, především pak v polovodičích. Znovu si pak připomeňme, že výčet jevů není a nemůže být ani zdaleka uzavřený a že i systematika je v úplných začátcích. Následující rozdělení na čtyři kapitoly – plazmové kmity, šíření vln, nestability a pinch-efekt – je zatím spíše pokusem o logickou stavbu popisu. Nesnáze vyplývají samozřejmě i z české terminologie, jež v některých případech nemá zatím vžitá termíny.

PLAZMOVÉ KMITY

Objev plazmových kmitů v částečně ionizovaných plynech (1927) znamenal vlastně zrození fyziky plazmatu. Plazmovými kmity rozumíme uspořádaný pohyb souboru nabitých částic působením coulombovských sil dalekého dosahu. Jestliže se např. objeví volná díra uprostřed oblaku elektronů, oblak volných elektronů se smrští tak, aby se zachovala nábojová hustota. Volné částice však při tomto procesu nabudou určité kinetické energie, přeběhnou rovnovážnou polohu a vytvoří relativní nadbytek náboje ve středu celku. To vede k opačnému procesu – k expanzi mraku nabitých částic. Místní porucha rovnováhy v plazmatu zaniká tedy periodicky s charakteristickým kmitočtem daným vztahem

$$v_p = \left(\frac{e^2 n}{\pi \epsilon m} \right)^{1/2},$$

kde e – elementární náboj, n – hustota volných nabitých nábojů, m – jejich hmota, ϵ – dielektrická konstanta použité látky. Je-li kmitavý pohyb kladných a záporných nábojů vzájemně ve fázi, mluvíme – podobně jako u kmitů mříže – o akustickém kmitu; opačný případ nazýváme optickým. Kolektivní nábojové odstínění – jak již bylo řečeno – se uskuteční ve vzdálenosti srovnatelné s Debyeovou délkou, což současně znamená, že vlnová délka plazmových kmitů je omezena zdola touto veličinou a ve spektru se vyskytuje mezní kmitočet.

V pevných látkách jsou uvedené podélné kmity kvantovány a elementární excitace se označuje termínem plazmon. Energie plazmonu v kovech dosahuje 10–20 eV, tj. tak vysokých hodnot, že je vyšší než maximální energie elektronů ve vodivostním pásu (na Fermiho ploše), a plazmon nemůže být tedy tepelně buzen. Vzniká pouze působením nabitých energetičtějších částic při neelastických srážkách. V polovodičích s nízkou koncentrací volných nositelů náboje jsou poměry pro vznik a existenci plazmonů při termické rovnováze podstatně příhodnější, neboť střední energie elektronů obvykle převyšuje veličinu $h\nu_p$. Běžnější případ sledování plazmonů v polovodičích se týká elektronů ve vodivostním pásu. Při velmi vysokých energiích nabitých částic či fotonů dopadajících na pevnou látku mohou ovšem přispívat k plazmovým kmitům i elektrony valenčního pásu.

ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

Problém interakce mezi volnými nositeli náboje a elektromagnetickým zářením v pevných látkách je velmi široký; spadá sem např. absorpce volnými nositeli, Faradayova rotace, cyklotronová rezonance a další efekty. Všimněme si však jiného typického jevu, a to šíření příčných elektromagnetických kmitů podél stálého magnetického pole.

Bez magnetického pole se nešíří plazmatem elektromagnetické vlnění, jehož kmitočet je nižší než odpovídá plazmovým kmitům. Statické magnetické pole situaci hlavně u plazmové hrany mění. Z našeho hlediska zaslouží si pozornosti především oblast nižších kmitočtů, kde nám může pomoci následující představa: Jednotlivé náboje díky silám dalekého dosahu jsou nuceny se pohybovat podobně, jako by byly upevněny na hmotné struně. Uvážíme-li vliv přiloženého stálého magnetického pole, jehož směr v naší analogii je rovnoběžný se směrem struny, vede řešení tohoto případu ke dvěma možným závěrům. Jsou-li na struně přítomny současně obě polarity volných nositelů náboje, a to ve stejných koncentracích, nemá magnetické pole vliv a rovina kmitů se nemění. Elektromagnetické záření při průchodu pevnou látkou zůstává lineárně polarizováno a shodně po svém objeviteli v plynném plazmatu bývá označováno jako Alfvénovy vlny. Experimentálně byly sledovány Alfvénovy vlny v neznámějším polokovu – vizmutu. Je-li však struna nabita převážně náboji jedné polarity, vede řešení uvedeného případu ke vzniku kruhové polarizace. V pevných látkách v nekompensovaných plazmatech poukázal na možnost šíření těchto vln Aigrain a současně použil i označení helikon. Helikony byly pozorovány jak v kovech, tak i v polovodičích, a to s výsledky velmi pozoruhodnými. Z rychlosti šíření kmitů bylo možno určit např., že u draslíku připadá jeden vodivostní elektron na jeden atom s odchylkou jednoho až dvou procent, tj. s přesností, již nelze dosáhnout zatím jiným způsobem. U jiných materiálů vedly pokusy k určení jiných závažných veličin (např. u PbTe dielektrické konstanty) a cenný je přínos studia těchto vln především v oblasti vyšetřování Fermiho ploch.

Význačnou vlastností helikonů i Alfvénových vln je, že představují pomalé elektromagnetické vlny. Jejich rychlost šíření souvisí s hustotou nositelů náboje, a může být tedy také v širokých mezích měněna. Zde se otevírá nové pole možností studia jejich interakce např. se zvukovými kmity a současně také nové zajímavé pole pro aplikace. Tak v praxi se již uplatnily zpoždovací linky a vysokofrekvenční izolátory pracující na uvedeném principu a rýsuje se využití obdoby vakuových prvků s postupnou vlnou. Bylo by možno říci, že problematika šíření kmitů plazmatem pevných látek je v období „hledání efektů“.

NESTABILITY

Dosud popisované šíření vln mělo pasívní charakter, tj. nedocházelo k předávání energie plazmatu (získávané volnými nositeli v elektrickém poli) kmitům. Přitom

byl však experimentálně pozorován vznik celé řady oscilačních jevů spojených s nejrůznějšími podmínkami v plazmatu pevných látek. Jedna z prvních nestabilit byla pozorována v paralelním elektrickém a magnetickém poli a použité zařízení bylo nazváno oscilistor. Jeho činnost je založena na růstu amplitudy spirální vlny v přítomnosti elektrického pole. Přestoupí-li intenzita pole určitou hodnotu a s ní hlavně driftová rychlost nositelů, dojde až k samobuzení. Pro technickou praxi je to ovšem zatím výsledek neupotřebitelný, neboť zařízení pracuje při héliové teplotě a při proudu řádově 1000 A. Značně důležitý zde opět je vzájemný poměr hustot volných nositelů náboje obou polarit. V případě jejich rovnosti nedochází k značnějšímu prostorovému přenosu náboje a nestabilita roste na místě. Jestliže však koncentrace nositelů jednoho znaménka silně převládá, náboj se působením použitých polí přenáší a porucha se pohybuje a zároveň roste.

Obzvláště v této oblasti roste nesmírně rychle počet prací a nových pozorování. Byly pozorovány oscilace s vysokými amplitudami, emise mikrovln, periodický přechod mezi stavem s pinch-efektem a bez pinch-efektu (bude o něm zmínka v dalším odstavci) a jiné pozoruhodnosti. Přitom interpretace nejsou zatím často uspokojivé. Ukazuje se také, že současný výskyt obou polí, elektrického a magnetického, není nutnou podmínkou vzniku nestabilit.

Právě se studiem nestabilit jsou spojeny představy o tom, že lze v jistém slova smyslu modelovat procesy v plazmatu velkých termojaderných zařízení pomocí vzorků z pevných látek. Použitím obdoby jakýchsi „magnetických nádob“ bylo např. zjištěno, že lze za určitých okolností podstatně zvýšit dobu života nerovnovážných nositelů náboje v polovodičích. A to by snad pak naznačovalo možnosti řešení, jak při termonukleárních studiích uchovat plazma při extrémně vysokých teplotách a pro magnetohydrodynamickou generaci elektřiny.

PINCH – EFEKT

Také tento jev, který záleží v soustředění či stažení plazmatu do omezeného prostoru – jakési obdoby kanálu – pod vlivem vlastního magnetického pole procházejícího proudu (magnetic pinch effect), je dávno znám z plynů. Podobný jev byl pozorován i v pevných látkách, např. antimonidu india – polovodiči s vysokou pohyblivostí nositelů náboje. Jeho původní interpretace byla založena na adiabatické teorii, tj. předpokládalo se, že plazma je ve špatném tepelném kontaktu s mřížkou pevné látky. Novější teorie DRUMMONDOVA a ANCKER-JOHNSONOVÉ vychází z právě opačné představy, tj. z dobrého tepelného kontaktu, a příčinu smrštění je pak třeba hledat v současném vlivu tepla a vlastního magnetického pole (magnetothermal pinch-effect). Je zajímavé, že tímto způsobem lze popsat i radiální koncentrační nehomogenitu plazmového sloupce, tj. pokles hustoty náboje v ose. Při vysokých příkonech ohřívá se vodivý sloupec plazmatu velmi rychle a dobrý přenos energie k mřížce vede k čistě tepelnému stažení plazmatu (thermal pinch-effect) až k protavení kanálu.

ZÁVĚR

Ukázali jsme si, že se při studiu pevných látek stále častěji setkáváme s jevy, jež nelze vysvětlit na základě jednoelektronového modelu a u nichž je třeba se zabývat kolektivním chováním celého souboru volných a vázaných nositelů náboje. Stejně představy se již dříve použilo v oblasti fyziky plazmatu v plynech, a proto se uvedené jevy označují jako plazmové. Zatímco ionizační energie v plynech činí obvykle několik elektronvoltů, je aktivační energie v pevných látkách značně nižší — u vlastních polovodičů kolem jednoho elektronvoltage, u příměsových je kolem setin eV a u degenerovaných je prakticky nulová. Odtud plyne, že plazmové jevy lze v pevných látkách pozorovat za obvyklé anebo dokonce velmi nízké — heliové — teploty. Podobná změna velikosti charakteristických parametrů mezi plazmatem v plynu a v pevné látce se týká hustoty náboje. Avšak přes výrazné rozdíly ve fyzikálních vlastnostech ionizovaných plynů a pevných látek existují mnohé zarážející podobnosti mezi oběma oblastmi plazmových jevů. S částí z nich jsme se seznámili.

Současný stav fyziky plazmatu v pevných látkách je charakterizován obrovským růstem experimentální práce, jejímž hlavním předpokladem je omezení rozptylu nositelů na přítomných příměsích a nehomogenitách, aby zkoumaný plazmový jev nebyl rušen. To ovšem předpokládá dokonale čistý materiál, což vyžaduje zvládnutí náročné technologie.

A nakonec nepatrná, ale zajímavá poznámka: některé z plazmových jevů, o nichž jsme se zmínili, se podařilo pozorovat také v kapalinách, a to na známém případě roztoku některých kovů ve zkapalněném amoniaku.

Literatura

- [1] ANCKER-JOHNSON B.: *Plasmas in Semiconductors and Semimetals. A review*. Published in *Semiconductors and Semimetals*. Vol. I. edited by R. C. Willardson and A. C. Beer, Academic Press, N. Y. 1965.
- [2] CHYNOWETH A. G., BUCHSBAUM S. J.: *Solid State Plasma*. *Physics Today* 18 (1965), No. 11, 26.
- [3] JONSCHER A. K.: *Solid State Plasma Phenomena*. *Brit. J. Appl. Phys.* 15 (1964), 365.
- [4] *Teorie pevných látek*. NČSAV 1965. Kap. V/7.

Spotřebu paliva nadzvukových letadel

dokumentuje tento případ: u letadla Concorde má rezerva paliva pro nepředvídané případy (čekání na povolení k přistání, nepříznivé meteorologické podmínky, opakování přistávacího manévru v případě nějaké závady) dosahovat 25 % celkového obsahu nádrží; tato rezerva sama váží víc než celý placený náklad. Bylo by ji možno snížit, kdyby čekání na povolení přistání bylo nahrazeno čekáním na povolení startu, jenže to by vyžadovalo převrat ve způsobu řízení leteckého provozu.

Sk