

SEKCE FYZIKY PEVNÝCH LÁTEK

VĚDECKÁ ČINNOST V LETECH 1952-1989

Antonín Šimůnek, Jan Kočka, Josef Křištofík a kolektiv



Zaměření ústavu v 50. a 60. letech se vyvíjelo v souladu s rozvojem vědy ve světě a s možnostmi přístrojového vybavení ústavu. Většina zařízení potřebných k výzkumu se vyráběla v ústavu, a to podle požadavků vědeckých pracovníků. Jako příklad můžeme uvést úkol, který

ředitel Bačkovský s profesorem Petržilkou uložil tehdy mladému, nezkušenému vědeckému pracovníkovi Allanu Línkovi: stanovte strukturu vínanu etylen-diaminového (EDT - ethylene-diamine-tartrate). Profesor Petržilka předpokládal, že znalost uspořádání atomů v této látce vysvětlí mechanismus piezoelektrických vlastností. Pro řešení měl Allan Línek jako přístrojové vybavení Weissenbergův rtg. goniometr, Debye-Scherrerovu komůrku, za zdroj záření domácí sestavenou rtg. aparaturu a jako „výpočetní techniku“ dětské kuličkové počítač. To byl nejslabší článek celého řetězu a s největší pravděpodobností důvod pro to, že Allan Línek udělal tolik pro automatizaci výpočetních prací při řešení krystalových struktur a vůbec pro zavedení výpočetní techniky v ústavu. Během padesátých let navrhl po poradách s pracovníky Ústavu matematických strojů (zejména s Antonínem Svobodou) postupně celkem čtyři jednoúčelové reléové výpočetní stroje. Jedny z nich byly vyrobeny vlastními silami laboratoře (*ELIŠKA*, *SuperELIŠKA*), jiné dodány firmou Aritma (*M1*, *M2*).

Mezinárodním oceněním vědeckých výsledků v oblasti strukturální analýzy byl pak exponát v Paláci vědy na Světové výstavě v Bruselu v roce 1958 (model struktury EDT). Po vyřešení struktury EDT navázal Allan Línek kolem roku 1960 spolupráci s L. Jenšovským a V. Synečkem na řešení struktur vybraných komplexních perkuprátů a perjudátů, podařilo se vyřešit strukturu látky obsahující trojmocnou měď [I. Hadinec, L. Jenšovský, A. Línek a V. Syneček, *Naturwiss.* **47**, 377 (1960)].

První komerční počítač, který ÚFPL získal v roce 1963, byl *Zuse 22R*, v roce 1971 byl uveden do

provozu počítač TESLA 200, stroj, jehož operační paměť byla neuvěřitelných 64 kB (neuvěřitelných jak z pohledu své doby, tak i té dnešní). Počítač TESLA 200 už vyžadoval vyšší programovací jazyk Fortran. Ve spolupráci s Ústavem chemie a biochemie ČSAV byly řešeny struktury přírodních látek na základě terpenů a struktura kostunolidu [A. Línek a C. Novák, *Acta Cryst. B* **34**, 3369 (1978)], ucelený soubor prací věnovaný struktuře heteroboranů byl pak oceněn cenou akademie v roce 1982. Zásadní změnou pro rozvoj experimentu ve strukturální analýze byl nákup difraktometru Hilger & Watts v roce 1967. Neustálé technické a softwarové zdokonalování tohoto zařízení umožnilo jeho provoz až do roku 1999. Počítač TESLA 200 byl nahrazen v roce 1981 počítačem Siemens 7356, který značně rozšířil výpočetní možnosti tím, že operační systém umožňoval již přímou interakci s uživatelem (historii výpočetní techniky v ústavu je věnována zvláštní kapitola).

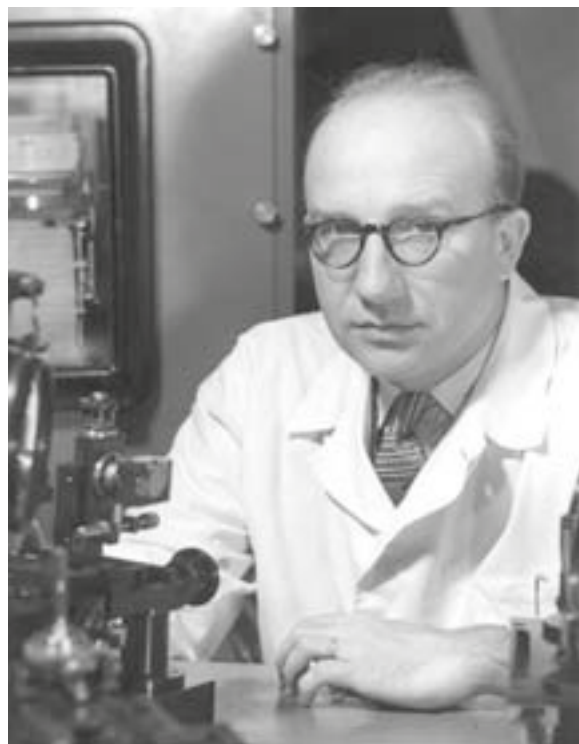
První práce nového oddělení polovodičů v ÚFPL pod vedením Jana Tauce se týkaly fotoelektrických a termoelektrických jevů, zejména v Ge, Si a InSb, a byly shrnuty do knihy publikované nejprve česky (1958), později v angličtině pod názvem *Photo and Thermoelectric Effects in Semiconductors* (Pergamon, London 1962). Tato kniha byla mnohokrát citována a sloužila několika generacím fyziků pevných látek. Za zmínku stojí fakt, že na svoji první zahraniční stáž přijel v roce 1959 do oddělení polovodičů z Leningradu Žores Alferov a seznámil se zde poprvé s technologií sloučeninových polovodičů, za jejichž aplikaci v heterostrukturách obdržel v roce 2000 Nobelovu cenu za fyziku. Rychlé zvládnutí nejen hrotových tranzistorů, ale i slévaných, difuzních i tažených PN-přechodů, spolupráce s fyziky z jiných institucí (zmiňme zejména Helmara Franka) a jejich obrovské popularizační úsilí prosadit polovodiče do výroby, to vše pomohlo zachytit tehdejšímu Československu první nástup tranzistorů, zejména ve výrobě rozhlasových a televizních přijímačů.

Důležitou roli sehrál fakt, že v ústavu byli vynikající technologové, jakými byli Zdeněk Trousil, který dokázal připravit krystaly Ge a Si nejen o vysoké čistotě, ale také s minimem dislokací, a Karel Šmirous, který se zaměřil na sloučeninové polovodiče typu GaSb, InSb. Dokonalé krystaly germania a křemíku

byly potřebné nejen pro studium polovodičů, ale také pro rozvoj experimentální techniky při konstrukci krystalových spektrometrů. Byla vytvořena teorie trojkrystalového difraktometru a na jejím základě postaven difraktometr, na kterém byla experimentálně ověřena dynamická teorie difrakce na dokonalých krystalech (Růžena Bubáková, Jiří Drahokoupil a Antonín Fingerland). Přestože byly tyto práce publikovány v *Czech. J. Phys.*, měly značný mezinárodní ohlas. Experimentální zařízení v té době byla téměř všechna konstruována a stavěna na pracovišti díky mimořádně schopným technikům a mechanikům. Dalším příkladem takového zařízení vlastní konstrukce a výroby byl elektronový difraktometr (elektronograf Miroslava Rozsívala), předchůdce dnešní techniky RHEED pro studium struktury povrchů. Většina oddělení v té době měla vedle experimentu vlastní teoretickou skupinu, elektronickou, popř. mechanickou dílnu a technologickou laboratoř, což mj. vedlo k těsné spolupráci teorie a experimentu. Tradiční spolupráce s průmyslem pokračovala konstrukcí, výrobou a předáním rtg. kvantometru pro více komponent ocelárně Poldi Kladno (Jiří Drahokoupil 1964).

Rozsáhlým směrem výzkumu koncem padesátých let bylo studium elektronové struktury polovodičů, opět zejména Ge a Si, a to jak experimentálními spektroskopickými metodami v širokém oboru energií, na nichž se kromě Jana Tauce významnou měrou podíleli Antonín Abrahám, Milena Závětová a Libuše Pajasová, tak teoretickým popisem na hranici mezi formální teorií a materiálovým výzkumem. Pražská skupina zásadně přispěla k porozumění optickým hranám, k modelování absorpčních koeficientů krystalických i amorfních polovodičů a komplexní Kramersově-Kronigové analýze experimentálního indexu lomu a reflektivity [viz shrnutí M. Závětová, B. Velický, *Optical Properties of Solids - New Developments*. Ed. P. O. Seraphin (1976) kapitola 8, s. 379]. Originalita publikací i jejich úspěšná prezentace na mezinárodních konferencích vedly k tomu, že pořádání *The Fifth International Conference on the Physics of Semiconductors* v roce 1960 bylo svěřeno Praze. Byla to první akce takového významu v zemi sovětského bloku, poprvé se setkali významní vědci tohoto oboru ze Západu a Východu, například tři nositelé Nobelovy ceny za vynález tranzistoru z USA a nestor sovětské fyziky polovodičů A. F. Yoffe. Její pozitivní dopad byl dlouhodobý. Po smrti Karla Šmirouse byly obnoveny práce na sloučeninových polovodičích až s příchodem Tomislava Šimečka, kterému se v roce 1963 podařilo připravit první československý polovodičový GaAs laser difuzní technologií.

Během své stáže na Harvardské univerzitě (1961-1962) začal Jan Tauc přemýšlet, jak se změni optické vlastnosti, když dojde ke ztrátě uspořádání



1/ Jan Tauc

na dlouhou vzdálenost, které je charakteristické pro krystaly. Studium kapalin ukázalo, že rozhodující pro optické vlastnosti je tzv. uspořádání na krátkou vzdálenost, které se často zachovává i v nekrystalických látkách (sklech). Když v Bukurešti Radu Grigorovici úspěšně připravil napařováním na chlazený substrát amorfní Ge ve formě tenké vrstvy, byl to začátek mnohaleté spolupráce, při které se Radu Grigorovici kromě přípravy soustředil na strukturu a transportní vlastnosti a Jan Tauc na vlastnosti optické. Roku 1965 v Praze a 1967 v Bukurešti spolu s dalšími zorganizovali *1. resp. 2. Conference on Amorphous and Liquid Semiconductors (ICALS)* a dali tím důležitý impuls k celosvětovému rozvoji tohoto oboru. Třetí konference této řady se v Cambridge (i díky prvním ukázkám praktického využití, jakými byly spínací a paměťové prvky z chalkogenních polovodičových skel) zúčastnilo v roce 1969 již víc než 200 vědců.

Zásadní prací z tohoto období [J. Tauc, R. Grigorovici, A. Vancu, *Phys. Stat. Sol.* **15**, 627 (1966)] bylo empirické pravidlo, umožňující určit z absorpčního koeficientu v okolí absorpční hrany tzv. optický zakázaný pás, dnes často nazývaný „Tauc gap“. Toto jednoduché pravidlo, založené na několika odvážných předpokladech, bylo mnohokrát citováno a potvrzeno na řadě amorfních materiálů. Stáž Jana Tauce na Harvardské univerzitě otevřela později cestu na Harvard mladým teoretikům Bedřichu Velickému (elektronové stavy pevných látek) a Zdeňku Horákovi (rtg. spektroskopie).

Výzkum v oblasti nekystalických polovodičů byl zaměřen několika směry. Jednak na tenké vrstvy amorfního germania (a-Ge) a zejména a-Si, připravené napařováním a později také naprašováním (Josef Zemek, Stanislav Koc, Václav Šmíd, Igor Kubelík, Aleš Tříska), jednak na skla, jejichž základním modelovým materiálem byl CdAs₂, který bylo možné připravit i v krystalické formě a tak studovat zejména dynamiku kmitů mříže (Ivan Gregora). Významná byla především skla v systému Ge_xCdAs₂, ve kterých byly studovány [viz např. J. of Non-Cryst. Sol. 4, 258 (1970)] zejména strukturní (Ladislav Červinka) a optické vlastnosti v okolí hrany vlastní absorpce (Vladimír Vorlíček). Díky ojedinělé schopnosti technologa Arnošta Hrubého připravovat některá chalkogenní skla, zejména As₂Te₃, ve formě polovodivého skla byla publikována řada originálních prací týkajících se optických (Milena Závětová, Antonín Abrahám), ale i transportních vlastností chalkogenních skel (Jan Kočka, Vladimír Cháb), a to i za vysokého tlaku (Josef Křištofík). Studovány byly rovněž magnetické vlastnosti vybraných polovodičů (Miloš Matyáš).

Teoretický popis pevných látek, založený na kvantové teorii, zavedl v Praze Zdeněk Matyáš po návratu ze studijního pobytu 1946-1948 u Nevilla Motta (pozdějšího nositele Nobelovy ceny). Základy moderní teorie pevných látek a zejména polovodičů byly položeny ve druhé polovině padesátých let a na půdě ÚFPL jsou spojeny zejména se jmény Emila Antončíka a později Bedřicha Velického. Emil Antončík [J. Phys. Chem. 10, 314 (1959)] nezávisle na práci J. C. Phillipse a L. Kleinmana [Phys. Rev. 116, 287 (1959)] navrhl metodu pseudopotenciálu pro výpočty pásových struktur krystalických látek, která byla poprvé aplikována na popis CdSb s komplikovanou elementární buňkou. Mezinárodní konference o polovodičích (1960) ještě více posílila zaměření výzkumu v tomto směru i po stránce teorie, průkopnickým krokem bylo uspořádání letní školy v Podhradí u Ledče nad Sázavou (1963), vydané knižně nakladatelstvím ČSAV (1965).

Rozvoj teorie pásové struktury krystalických látek, první dosažitelné počítače a metody umožňující počítat elektronové stavy v obecných bodech Brillouinovy zóny vedly k výpočtům tzv. měkkých rentgenových spekter, též zvaných rtg. emisních pásů. První výpočty emisních pásů na tehdy dostupných počítačích MINSK a TESLA 200 byly realizovány pro spektra hliníku Ludvíkem Smrčkou (1971), pro spektra sloučenin GaAs a ZnSe Antonínem Šimůnkem (1973). Tyto výpočty významně přispěly k pochopení struktury elektronových stavů v pevné látce, srovnání s experimentem umožnilo otestovat aproximace v tehdy tzv. „neselfkonzistentních“ výpočetních technikách. Podobně jako v experimentu začínali teoretici také

s prázdnými rukama, tj. pouze se znalostí metody a s učebnicí programovacího jazyka. Program pro počítač včetně numerických procedur byl jejich vlastním dílem, doba standardních programů byla ještě v nedohlednu. Na druhou stranu vlastní programy umožňovaly velice pružné zásahy a změny v kódu, získávání zkušeností a rychlý rozvoj výpočetních technik. První „selfkonzistentní“ výpočty metodou pseudopotenciálu byly realizovány pro krystalické polovodiče A. Šimůnkem již v roce 1976 na počítači TESLA 200.

Zájem o neuspořádané látky, jako jsou slitiny a směsné krystaly či amorfní polovodiče, vyžadoval přechod k metodě těsné vazby. V jejím rámci bylo zformulováno přiblížení koherentního potenciálu (CPA). Metoda CPA [viz např. B. Velický, S. Kirkpatrick, H. Ehrenreich, Phys. Rev. 175, 747 (1968)] se stala hlavním prostředkem pro kvantitativní teorii kovových i polovodičových materiálů, ale i neuspořádaných povrchů a rozhraní. Byla proto mnohokrát citována. Na formální úrovni se teorie věnovala vzniku různých typů kvazičástic v pevných látkách (excitony, polarony) a mnohačásticovým jevům, zejména popisu tzv. U<0-center v amorfních polovodičích. Hlavním nástrojem byla teorie Greenových funkcí, kterým byl věnován kurs ve vile Lanna.

Po odchodu Jana Tauce do USA a Emila Antončíka do Dánska (1969), vynuceném potlačením Pražského jara, převzal oddělení polovodičů Ladislav Štourač. Bylo obnoveno studium sloučeninových polovodičů typu A^{III}B^V pro účely optoelektronických aplikací, kdy Tomislav Šimeček a Eduard Hulicius začali metodou kapalně epitaxe (LPE) opět připravovat moderní polovodičové laserové struktury a struktury pro spontánní polovodičové diody jak pro základní výzkum, tak pro Teslu Blatná a řadu dalších pracovišť. Začátkem osmdesátých let byly připraveny objemové krystaly GaAs se sníženou hustotou dislokací a naopak se ve spolupráci se skupinou Žorese Alferova znovu začínají připravovat monokrystaly GaSb jako substráty pro nové lasery pracující ve střední infračervené oblasti (František Moravec, Bedřich Štěpánek, Věra Šestáková). Studium luminiscenčních vlastností těchto materiálů bylo hlavní náplní skupiny Josefa Pastrňáka, která po sloučení Fyzikálního ústavu a Ústavu fyziky pevných látek přešla do Oddělení polovodičů (1979). Byla vyvinuta unikátní metoda luminiscenční topografie ke studiu homogenity rozložení mělkých příměsí a dislokací v substrátových deskách GaAs a studován vliv hlubokých příměsí např. EL2 center na optické a elektrické vlastnosti.

V roce 1981 byla jako prvá v Československu postavena aparatura pro epitaxní růst polovodičů z molekulárních svazků (MBE) (Mojmír Láznička, Jiří J. Mareš), která byla využívána pro přípravu

heterostruktur amorfní/krytalický polovodič a neslévaných epitaxních kontaktů pro lasery. V souvislosti s rozvojem těchto technologií se dostává na dobrou úroveň i charakterizace hlubokých příměsí v polovodičích pomocí nových transienčních metod DLTS a PICTS (Václav Šmíd, Jozef Krištofik, Pavel Hubík, Jan Zeman). Skupina Josefa Pastrňáka se zaměřila na studium fotoluminiscence a elektroluminiscence tenkých polovodičových vrstev a struktur. K nejvýznamnějším výsledkům tohoto období patří pozorování a vysvětlení tzv. elektrických filamentů (výbojových vláken) v slabě legovaném GaAs [F. Karel, J. Oswald, J. Pastrňák, O. Petříček: *Semicon. Sci Technol.* **7**, 203 (1992)].



2/ První československý GaAs/GaAlAs polovodičový heterostrukturální laser (FZÚ)

Potřeba jaderných detektorů si vynutila studium krystalického ultračistého Ge (koncentrace příměsí menší než 10^{10} v kubickém cm!). Takovéto monokrystaly se podařilo připravit opět Zdeňku Trousilovi a řada pracovníků se podílela na charakterizaci jeho vlastností (Igor Kubelík, Aleš Tříška, Václav Šmíd, Zbyněk Šourek).

Když Walter Spear a Peter LeComber z univerzity v Dundee prokázali [*Solid State Commun.* **17**, 1193 (1975)], že a-Si připravený rozkladem silanu v doutnavém výboji je možno dopovat a měnit jeho vodivost o deset řádů, nastala nová éra výzkumu amorfních polovodičů, která vyústila v nové průmyslové odvětví (ploché displeje, fotovoltaické články). Tento materiál je dnes označován jako amorfní hydrogenizovaný křemík (a-Si:H), neboť se prokázalo (za přispění Aleše Tříšky), že obsahuje cca 10 at. % vodíku.

První práce, charakterizující elektrické a optické vlastnosti a-Si:H [viz např. J. Zemek, M. Závětová, S. Koc: *J. Non - Cryst. Sol.* **37**, 15 (1980)] byly v Praze provedeny na a-Si:H, připraveném naprašováním ve směsi argonu a vodíku.

Po spojení FZÚ a ÚFPL v roce 1979 vzniklo nové Oddělení materiálového výzkumu. Významnou částí výzkumu tohoto oddělení se stal právě a-Si:H, a to i díky tomu, že Jan Kočka se během pobytu na *Cavendish Laboratory* univerzity v Cambridge

(1977-1978) seznámil také s výsledky laboratoře Waltra Speara a po návratu se na a-Si:H plně soustředil. Zkušenost s amorfními polovodiči i spolupráce inženýrů a technologů (zejména Jiřího Stuchlíka) umožnila rychlý start přípravy a-Si:H rozkladem silanu a jeho charakterizace. Po doplnění týmu (1980) o zkušeného optika (Milan Vaněček) bylo publikováno několik zásadních prací věnovaných určování počtu lokalizovaných elektronových stavů v a-Si:H metodou konstantního fotoproudu, tzv. CPM (Constant Photocurrent Method), která je dodnes celosvětově používána. Tyto práce [viz např. *Solar Energy Materials* **8**, 411 (1983)] získaly stovky citací a přispěly k tomu, že Praha byla po 22 letech opět pověřena uspořádat světovou konferenci, věnovanou amorfním polovodičům - ICALS 12 (1987). Studium nedopovaných i dopovaných vzorků a-Si:H metodou CPM, pomohlo vytvořit ucelený model hustoty stavů v a-Si:H. To umožnilo vyvinout a v omezené sérii ve spolupráci s Teslou Vakuová technika i vyrábět na bázi a-Si:H tzv. vidikon, televizní snímací elektronku.



3/ Vidikon s terčíkem na bázi a-Si:H vyvinutý ve FZÚ a vyráběný ve spolupráci s Teslou Vakuová Technika.

Na tomto místě je třeba se zmínit o elektronikovi Emilu Šípkovi, který se záhy po nástupu (1958) pod vedením Jana Tauce zapojil do stavby unikátních aparatur. Patentoval a pro měření nízkých signálů zakrytých šumem postavil patrně první synchronní detektor (Lock-in-Amplifier) v Československu a obhájil tím svou kandidátskou práci. Tento princip byl překonán až nástupem digitální techniky v 90. letech. Emil Šípek zachytil (1968) nástup nejprve stolních kalkulátorů (HP 9830 a 9825) tzv. normy HPIB (1975) a v roce 1987 i prvních stolních počítačů (Olivetti M 24 a 28) a využil je ihned k řízení experimentů. Bez automatizace metody CPM a kvalitních vzorků a-Si:H by patrně metoda CPM nedosáhla svého ohlasu.

Od založení sektoru iontových krystalů (1954) až do let sedmdesátých byly práce pod vedením Antonína Bohuna zaměřeny na defekty v krystalech, zejména tzv. barevná centra, jejichž původem je zachycení elektronu nebo díry krystalickou mřížkou

způsobující zbarvení krystalů. Výsledky termoluminiscence, tepelně stimulovaného bělení a detekce elektronů vyletujících z krystalu během ohřevu (exoemise) umožnily vysvětlit základních procesů vzniku a interakce bodových defektů. Druhým směrem byl výzkum optických vlastností, zejména absorpce a luminiscence (Jarmila Dolejší) iontových krystalů dotovaných ionty přechodových kovů. Pro analýzu těchto jevů byly rozvinuty teorie krystalového, resp. ligandového pole a posléze převzata teorie molekulárních orbitálů (Karel Polák), jejichž další modifikace jsou základem výpočtů bodových defektů dodnes. Poněvadž se brzy ukázalo, že důležitým požadavkem je co nejvyšší chemická čistota, rozpracovali Jaroslav Trnka a Mirek Lébl metodu čištění výchozí taveniny, která umožnila přípravu aniontově velmi čistých krystalů. S postupem doby zesílila potřeba věnovat se také růstu krystalů, zvláště pro velmi specifický krystal Hg_2Cl_2 (kalomel), který měl i aplikační možnosti v oblasti infračervené spektroskopie.

Jedním z důležitých programů Oddělení materiálového výzkumu bylo studium solidifikace jak v podmínkách mikrogravitace na kosmických stanicích, tak při vysokých přetíženiích simulovaných na centrifugách, které ovlivňují transport hmoty a energie, a ve svém důsledku podchlazení tavenin. Jako modelové materiály byly studovány soustavy $\text{PbCl}_2\text{-AgCl}$ a skla Ge-Sb-S (strukturu řešila skupina Ladislava Červinky). Byl vyvinut krystalizátor (Čestmír Barta), který po mnoho let pracoval v rámci programu Interkosmos na kosmické stanici Mir. Kosmické experimenty prokázaly vliv mikrogravitace na změnu struktury a složení vícesložkových materiálů. Byla rozvinuta teorie tzv. kinetických fázových diagramů (Zdeněk Chvoj), které jsou nezbytné za podmínek daleko od rovnováhy. Pozornost v souvislosti s interpretací kosmických experimentů byla věnována zejména rychlosti chlazení, která rozhodujícím způsobem ovlivňuje podchlazení taveniny. Byl tak vysvětlen [viz např. Z. Chvoj, J. Šesták, A. Trnka: *Kinetic Phase Diagrams*. Elsevier, Amsterdam 1991] posuv eutektického bodu sloučenin $\text{PbCl}_2\text{-AgCl}$ s růstem podchlazení taveniny.

V počátku 70. let se v oddělení kovů ÚFPL ČSAV zabývala skupina pracovníků pod vedením Karla Míška vlastnostmi bodových defektů, především vakancí, v ušlechtilých kovech. Experimentální metodikou bylo především měření transportních a galvano-magnetických vlastností za nízkých teplot a skupina již tehdy disponovala na tu dobu slušným přístrojovým vybavením (heliové lázně kryostaty, supravodivé magnety). V polovině sedmdesátých let se těžiště výzkumu posunulo k tzv. fermiologii - rozvoji metod zkoumání Fermiho ploch různých kovů a polokovů. Skupina se prosadi-

la spíše v teorii, experimenty se omezily na zkoumání transportních vlastností bismutu a později amorfních kovových slitin. Dále se rozvíjelo experimentální zázemí - již v této době např. skupina provozovala unikátní picovoltmetr se SQUIDem a byl experimentálně studován kvantový magnetotransport v různých materiálech, který se naplno rozvinul až v 90. letech.

V roce 1979 se vznikem FZÚ skupina přešla z Oddělení kovů do nově ustaveného Oddělení nízkých teplot. Náplň experimentálního studia se tím příliš nezměnila a byla ovlivněna tím, že skupina postrádala vlastní technologické zázemí. Rozvíjela se metodika měření v silných magnetických polích za nízkých teplot, zkoumanými materiály byly amorfní kovové slitiny a později, s celosvětovým prudkým rozvojem vysokoteplotní supravodivosti v roce 1986, také tyto materiály. V té době se však teoretická skupina již intenzivně zabývala jinou problematikou - objev tzv. kvantového Hallova jevu (KHJ) v roce 1980 odstartoval éru nízkorozměrových elektronových systémů a teoretikům skupiny se podařilo zachytit tento vývoj prakticky od začátku. První významný teoretický článek na toto téma, dodnes citovaný ve světové literatuře, pochází z roku 1982 [P. Středa, *J. Phys. C: Solid St. Phys.* **15**, L717 (1982)]. Přejít od kovů k polovodičům nebyl nijak násilný. Dvourozměrný elektronový plyn ve strukturách, na kterých je KHJ pozorován, je vlastně kovovou vrstvou vnořenou do polovodiče.

Již od počátku existence ÚTF byla vedle studia struktury a elektrických vlastností látek věnována velká pozornost i studiu jejich vlastností magnetických. Pokračovala ještě ryze aplikační tematika magnetické defektoskopie (J. Brož, F. Vilím) a první studia magnetických vlastností pevných látek byla v padesátých letech věnována především kovovým materiálům (např. velmi čisté křemíkové železo), včetně prvních pokusů o přípravu a sledování charakteristik tenkých vrstev, kde se experimentálně uplatnil také J. Šternberk. Počátkem 60. let však již převládly oxidické magnetické materiály. Jednalo se především o tehdy moderní podvojně oxidy železa a dalších 3d-transitivních prvků se spinelovou strukturou - tzv. ferity. Při tomto výzkumu vedle experimentální skupiny vedené Jaromírem Brožem a později Svatoplukem Krupičkou hrála podstatnou roli i vznikající technologická skupina magnetického oddělení (A. Bergstein, P. Holba, E. Pollert a další). Studovaly se hlavně manganato-hořečnaté a manganato-zinečnaté ferity, které vedle základní poznávací úlohy měly rovněž i značný aplikační význam. Volba těchto materiálů byla motivována i dlouholetou spoluprací s českým výrobcem feritových materiálů a s jeho aplikovaným výzkumem v Šumperku. Z fyzikálního hlediska bylo sjednocující myšlenkou studium vlastností systémů

obsahujících ionty Mn^{3+} , které samovolně deformují své okolí (Jahnův-Tellerův efekt) a jejichž přítomnost ve feritech ovlivňuje řadu aplikačně významných vlastností, jako jsou anizotropie jak magneto-krytalová, tak indukovaná a jejich relaxační chování (S. Krupička, P. Novák a další). Strukturou feritových materiálů (a zejména vlivem Jahnova-Tellerova efektu na jejich strukturu) se v té době zabývala i skupina Ladislava Červinky. Spolu se studiem fázových diagramů a sledováním vlivu oxidačního stupně na magnetické a elektrické vlastnosti feritů (R. Gerber, V. Roskovec, Z. Šimša, K. Závěta) se tak pražské pracoviště stalo jedním z předních světových pracovišť v oblasti základního výzkumu ferospinelů. Významným počinem bylo vydání knihy S. Krupičky Fyzika feritů a příbuzných magnetických kysličníků (Academia 1969) a její cizojazyčné reedice.

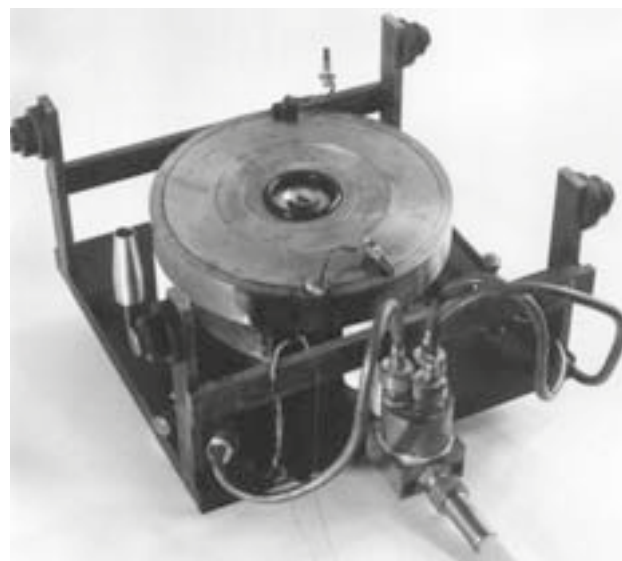
V 70. a počátkem 80. let převládá nad studiem ferospinelů široce založený a aplikačně nadějný výzkum magnetických granátů. Od dokonalé přípravy tenkých epitaxních monokrystalických vrstev, přes určování jejich krystalové struktury, pozorování a studium magnetických domén, měření jejich rezonančních a magnetooptických vlastností v širokém viditelném a infračerveném oboru záření (M. Nevřiva, E. Pollert, J. Šimšová, V. Kamberský, J. Kantůrek) zahrnoval tento výzkum i výpočty magnetického chování granátů provedené mladšími teoretiky. I když se očekávání spojená s využitím granátových vrstev v technice magnetického záznamu informací splnila jen částečně, ukázala tato etapa vysokou úroveň fyzikálního řešení problematiky tenkých magnetických vrstev a položila základ k současným pokročilejším technologiím přípravy nanovrstev a kompozitních magnetických materiálů. Granáty se ukázaly jako mnohostranně použitelný materiál s nastavitelnými magnetickými parametry, na němž se dají úspěšně testovat matematické modely různých magnetických uspořádání. V období, jež zahrnuje i současnost, se pozornost zaměřila na vysokoteplotní supravodiče, manganity se strukturou perovskitu a také, v souvislosti s využitím vysokých tlaků, na slitiny a intermetalické sloučeniny železa. Těmito tématům jsou níže věnovány samostatné odstavce.

Významné úspěchy přineslo studium magnetických vlastností amorfních látek. Prvé pokusy byly založeny na boritých sklech obsahujících dobře prozkoumané feritové fáze manganatých spinelů (J. Šesták, K. Závěta), ale vytčeného cíle - feromagnetického skla - se nepodařilo dosáhnout. V polovině 70. let se pak ve spolupráci s drážďanským ústavem Akademie věd pozornost obrátila na amorfní dráty a konečně na tzv. kovová skla, laboratorně produkovaná ve vysoké kvalitě Fyzikálním ústavem v Bratislavě. Rozhodujícím momentem pro úspěch tohoto výzkumu bylo spojení magnetických

oddělení Ústavu fyziky pevných látek a Fyzikálního ústavu v rámci reorganizace ČSAV, kdy se do tohoto směru významně zapojili i další pracovníci.

Podstatnou součástí Oddělení magnetik a supravodičů je od roku 1990 laboratoř vysokých tlaků. V 60. letech úspěšně zkonstruoval první jednoduchou vysokotlakou aparaturu J. Klimovič, mladý aspirant ve skupině J. Bačkovského. Rozvoj metodiky měření vlastností pevných látek při jejich všestranném kvazihydrostatickém stlačení byl v ústavu po řadu let silně stimulován úzkou spoluprací s národním podnikem Pramet v Šumperku, který v těch letech, s použitím vysokotlakých aparatur typu „belt“, úspěšně vyřešil výrobu diamantů v ČSSR. Vysokotlaké aparatury stejného typu pak byly v oddělení vysokých tlaků Fyzikálního ústavu ČSAV využívány až do konce 80. let ke studiu výrazných magnetoobjemových jevů v krystalických i amorfních slitinách přechodových kovů za vysokých tlaků. Působením vnějších hydrostatických či kvazi-hydrostatických tlaků o velikosti 1-10 GPa (~ 10-100 tisíc atm) bylo možno vyvolat v kovech až několikaprocentní objemové změny. Aparatura typu „belt“ byla používána k měření magnetické susceptibilitity slitin a k indikaci magnetických fázových přechodů v oblasti teplot 200 až 600 K za tlaků do 8 GPa. V 80. letech začal J. Kamarád rozvíjet techniku a metodiku využívání hydrostatických tlaků, která dodnes umožňuje rozsáhlé sofistikované studium intermetalických sloučenin v multiextrémních podmínkách nízkých teplot, vysokých magnetických polí a vysokých tlaků.

Počínaje polovinou 60. let byla velká pozornost věnována rovněž i spektroskopickým metodám. Byla vybudována laboratoř elektronové paramag-



4/ Aparatura typu „belt“ (bez horního kuželového pístu) s pyrofyllitovým kuželovým těsněním. Vzorek je umístěn v masce a AgCl a stlačován spolu s tímto pevným tlakovým prostředím.

netické rezonance (V. Šik, V. Havlíček), v níž byla studována spektra magnetických nečistot, zejména iontů skupiny železa v nemagnetických oxidech - spinelech a granátech. Motivací bylo pochopit chování magnetických oxidů na základě párových výměnných interakcí mezi magnetickými ionty a „jednoiontového modelu“ (individuálního příspěvku těchto iontů k magnetickým vlastnostem). Později byl spektrometr převážně využíván k měření feromagnetické rezonance magnetických vrstev (M. Maryško). Výsledkem byla řada kvalitních prací objasňujících zejména povahu magneto-krystalové anizotropie, vznikající v tenkých granátových vrstvách během jejich epitaxního růstu. V průběhu 80. let se pozornost obrátila také k jaderným spektroskopickým metodám - jaderné magnetické rezonanci a k Mössbauerově spektroskopii (spolupráce s laboratoří JMR a KFNT MFF UK). V magnetismu tyto metody hrají nezastupitelnou úlohu, protože jako jediné poskytují skutečně lokální informaci, specifickou pro daný atom.

V neposlední řadě je třeba zmínit laboratoř daleké infračervené spektroskopie. V době svého vzniku na konci šedesátých let (J. Kantůrek) patřila k několika málo světovým pracovištím umožňujícím měření spekter ve vlnovém rozsahu 0,06-0,74 mm v závislosti na teplotě a magnetickém poli. Při budování laboratoře bylo nutno překonat řadu technických obtíží spojených zejména s nutností dosáhnout vysoké citlivosti a stability měření. Vložené úsilí se vrátilo při studiu vysokoteplotních supravodičů - výsledky pokusů ukázaly na zásadní nesrovnalosti s tehdy všeobecně uznávanou teorií.

„Sametová revoluce“ (1989) vyvolala v této sekci řadu změn. Z oddělení materiálového výzkumu vznikla Oddělení tenkých vrstev a optických krystalů a z Oddělení polovodičů se vyčlenilo nové Oddělení povrchů a rozhraní. Zachováno zůstalo Oddělení strukturní analýzy a magnetik a supravodičů. Současné práce těchto šesti oddělení jsou popsány v následujících kapitolách.

POLOVODIČE

Jozef Krištofík, Eduard Hulicius, Pavel Lipavský a kolektiv

Fyzika polovodičů představuje velmi komplexní obor, který nezahrnuje, jak se obecně míní, pouze materiálový, případně úzce aplikovaný výzkum, nýbrž zvláště v posledním desetiletí otevírá i problematiku, která se přímo dotýká samotných základů přírodovědy.

Výzkum v oddělení polovodičů navazuje na padesátiletou tradici. V současné době se oddělení zabývá převážně experimentálním studiem polovodičových systémů se sníženou dimenzí. Dosáhnout výborných výsledků v této oblasti by bylo nemyšlitelné bez dobrého technologického zázemí a kvalitní práce teoretiků. V oddělení polovodičů se proto kromě dvou experimentálních skupin na výzkumu podílí i technologická laboratoř a dva teoretici.

TEORIE

O polovodičích se říká, že jsou laboratoří fyziky. Pro teorii pěstovanou v oddělení polovodičů to platí dvojnásob.

Zatímco všechny skutečné kovy mají řádově stejnou hustotu elektronů, třírozměrnou krystalovou mřížku a vlnovou délku elektronů mnohem menší než šířka sebetenčního drátku, v polovodičích lze pomocí příměsí hustotu měnit o mnoho řádů a je

možné připravit struktury tak jemné, že se chovají jako dvourozměrný kov, nebo dokonce jednorozměrný kov či tečka. Takové systémy dovolují pozorovat fyzikální jevy jinde nedostupné.

Jedním z velmi studovaných procesů jsou srážky mezi částicemi, díky kterým jeden druh částic uvedený do pohybu strhává i částice ostatní. Toto strhávání nemusí mít jen charakter srážek podobný srážkám molekul v plynu. Pohybující se částice rozhrnuje částice ve svém okolí, aniž by prudce změnila směr. Při rozhrnování se okolní částice trochu posunou ve směru prolétající, takže přispívají k celkovému proudu v systému. V běžných systémech je tento jev pozorovatelný pouze nepřímo. V polovodičích lze připravit dva dvourozměrné kovy, které jsou dostatečně vzdálené, aby elektrony nemohly přeskočit z jednoho do druhého a přitom dostatečně blízko, aby se i mezi kovy vzájemně srážely a rozhrnovaly. Na každý z kovů jsou připojeny kontakty, takže elektrony v jednom kovu můžeme „rozběhnout“ elektrickým polem a pozorovat, jak se „rozběhnou“ i elektrony ve druhém. Měření při teplotách pod jedním stupněm Kelvinovy stupnice ukázala, že ono rozhrnování ovlivňuje i srážky elektronů s příměsí a to tak podstatně, že tento jev určuje velikost strhávaného proudu. Tuto zkušenost