

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 nemyslitelné 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 příměsmi a to tak podstatně, že tento jev určuje velikost strhávaného proudu. Tuto zkušenost

můžeme přenést i na jiné systémy, neboť se podařilo teoreticky popsat vliv rozhrnování na srážky jako opravu k rychlosti částice v pohybujícím se prostředí.

Kromě mikroskopických struktur nabízejí polovodiče další výjimečnou vlastnost - jsou nesmírně citlivé na vnější vlivy. Podívejme se na jedno z mnoha vnějších působení - hydrostatický tlak. V Oddělení polovodičů byly měřeny vlastnosti GaAs s příměsí, jejichž schopnost zachytit elektron na tlaku silně závisí: za vysokého tlaku jej vážou, za normálního tlaku jej neudrží. Pro teorii byla nejlákavější otázka, jak probíhá srážka elektronu s příměsí, jejíž schopnost působit na elektron se mění s časem. Tento proces nebyl v jiných systémech doposud studován, neboť se předpokládalo, že změna vzájemného působení povede ke značnému zesložitění celé teorie. Tyto obavy se potvrdily i nepotvrdily. První kroky při popisu tohoto systému skutečně ukazují na podstatně složitější vzorce. Dalšími úpravami je ale možné je natolik zjednodušit, že výsledná teorie je intuitivně jednoduchou úpravou Boltzmannovy teorie známé již 130 let. Prostě se započte konečná doba trvání srážky a malá změna energie během srážky.

Zkušenosti z rozptylu na příměsích mají opět velmi obecnou platnost. Díky slibné jednoduchosti výsledných rovnic se teoretici oddělení ve spolupráci s jadernými fyziky odhodlali odvodit podobné opravy pro srážky protonů a neutronů při reakci dvou těžkých jader. Výsledkem je opět úprava Boltzmannovy rovnice, jenže popis srážek navíc zahrnuje i pohyb částic během srážky. [P. Lipavský, K. Morawetz, V. Špička: *Annales de Physique* **26**, 1 (2001)]. Tyto úpravy lze překvapivě snadno zahrnout do výpočtů (tzv. simulací) reakcí a viditelně zlepšují souhlas výpočtů a měřených dat.

Drobná změna energie v průběhu srážky přispívá k tepelným vlastnostem materiálu. Ani tento jev není omezen na polovodiče. Započtením tohoto příspěvku se podařilo vysvětlit jednak nesouhlas mezi rychlostmi atomů He odvozovaných z tepelné kapacity a z proudění. Podobný nesouhlas je znám i pro pohyb protonů a neutronů při reakcích těžkých jader a má i stejné vysvětlení.

Na konec přidejme ještě jeden systém, jehož vlastnosti se podařilo teoretikům oddělení polovodičů vysvětlit díky zkušenostem s tlakem ovládanými příměsí. Po dobu srážky jsou elektrony svázány s příměsí a neúčastní se jiných procesů. Při popisu systému je tedy nutné tyto elektrony vyčlenit. Podobně je v supravodiči nutné vyčlenit elektrony, které vytvářejí tzv. Cooperovy páry. Pokud se hustota Cooperových párů mění z místa na místo, nsvázané elektrony se snaží přelít do méně obsazených oblastí, tedy tam, kde je víc vyčleněných elektronů. Velkému přelévání elektronů samozřejmě

zabrání elektrické pole. A právě toto pole je v supravodiči měřitelné, neboť všechna ostatní pole supravodič dokonale odstíní. Abychom byli přesní, elektrické pole v supravodiči je známo již 75 let. Podařilo se však jeho popis rozšířit tak, že je dnes použitelný i pro popis supravodivých vírů.

TECHNOLOGIE

Technologická skupina Oddělení polovodičů se v letech 1990-2002 především zabývala přípravou a základním studiem vrstev a struktur na bázi polovodičů $A^{III}B^V$ jmenovitě na bázi GaAs/AlGaAs, GaSb/GaInAsSb a InAs/GaAs. Základní technologickou metodou byla epitaxe z organokovových sloučenin (**Metal Organic Vapour Phase Epitaxy - MOVPE**). Z počátku se ještě uplatňovala kapalná epitaxe (**Liquid Phase Epitaxy - LPE**) a v rámci evropských grantů jsme se podíleli i na studiu laserových struktur připravených metodou molekulární epitaxe (**Molecular Beam Epitaxy - MBE**).

V první polovině 90. let byl v naší laboratoři také připraven první český luminiscenční porézni křemík a porézni GeSi.

TECHNOLOGIE MOVPE - K ČEMU SLOUŽÍ?

Fyzikální ústav AV ČR se již řadu let zabývá studiem sloučeninových polovodičů, heterostruktur i kvantově rozměrových jevů (v supermřížkách, kvantových jamách atd.), přičemž většina experimentálních prací musela probíhat na strukturách připravených na cizích pracovištích. Rozšíření vlastní technologické základny bylo tedy logickým krokem, neboť kapalná epitaxe již nebyla schopna plně vyhovět požadavkům doby.

Kvantově-rozměrové (nizkodimenzionální) struktury připravované ve FZÚ technologií MOVPE jsou příkladem spolupráce mezioborové, mezinárodní a s vysokými školami. Tyto struktury byly studovány různými neortodoxními metodami na řadě našich i zahraničních pracovištích (*High Magnetic Field Laboratory*, Grenoble; *Ioffeho ústav*, St. Petersburg).

V současné době studujeme laserové a světlovodné struktury, tranzistorové struktury HEMT, struktury pro rezonanční tunelování a vlnovody. Budou studovány transportní vlastnosti a defekty v kvantově rozměrových strukturách a jejich optické vlastnosti - pomocí např. elipsometrie, reflektivity, transmise a polarizace, dále pak chemickými procesy při růstu v MOVPE aparatuře.

Přístupnost aparatury MOVPE i struktur na ní připravených pro studijní obory MFF - UK, VŠCHT, FEL - ČVUT, MU - Brno (případně dalších) a společné projekty umožňují do základního i moderního aplikovaného výzkumu zapojit studenty i profesory vysokých škol. Výchova studentů schopných tuto

velmi složitou technologii používat v budoucnu i v našem průmyslu, ale i studium prakticky významných struktur, dává perspektivu znovuzkříšení moderní polovodičové výroby v ČR. Současně probíhá základní výzkum zatím komerčně nedostupných vrstev, struktur i součástí připravovaných z nových materiálů na bázi GaSb, InAs, které pracují na jiných fyzikálních principech než stávající komerční optoelektronické součástky.

SOUČASNÉ AKTIVITY

Polovodičové lasery emitující ve středně infračervené oblasti vlnových délek, připravované na bázi antimonidových sloučenin

Problém přípravy těchto laserů spočívá v odstranění intenzivní nezářivé Augerovy rekombinace, která znemožňuje při pokojové teplotě provoz jednoduchých laserových struktur emitujících na vlnových délkách 3-5 μm . Eliminace tohoto parazitního jevu tkví v přípravě sofistikovaných kvantově-rozměrových struktur. Tato problematika se na našem pracovišti začala řešit již před více než patnácti lety, tehdy ještě technologií LPE, s nevelkým zpožděním za světovými trendy. Později vznikl rozdíl mezi naší a světovou úrovní, který se dnes postupně vyrovnává. Důkazem tohoto tvrzení je naše účast již na třetím evropském projektu na toto téma a publikování.

Důležitou součástí výsledků jsou teoretičtější zaměřené práce týkající se vlastností GaSb/InAs kvaternárních vrstev, které se v uvedených laserech používají. Tyto práce vznikly vesměs ve spolupráci s Ioffeho ústavem. Do této kategorie spadá i spolupráce s VŠCHT na měření tenze par organokovů.

PŘÍPRAVA A STUDIUM POLOVODIČOVÝCH KVANTOVÝCH TEČEK A KROUŽKŮ

Mimořádně zajímavé jsou výsledky magnetofotoluminiscence změřené na našich kvantových tečkách (QD) v Grenoblu. Díky tamějšímu unikátnímu zařízení (magnetické pole až 28 T) jsme mohli studovat elektronové hladiny v QD, které v nižších polích zůstávají nerozlišené [K. Kuldová, J. Oswald, J. Zeman, E. Hulicius, J. Pangrác, K. Melichar, T. Šimeček, *Materials Science and Engineering B* **88**, 247 (2002)]. Práce v této oblasti pokračují také ve spolupráci s PřF MU v Brně - studium polarizačních vlastností struktur s QD, s MFF UK v Praze - charakterizace pomocí povrchové fotovoltaické spektroskopie a dále s CNRS v Grenoblu - magnetofotoluminiscence ve vysokých magnetických polích. Nově jsme zahájili přípravu na měření kvantových kroužků.

PŘÍPRAVA A STUDIUM POLOVODIČOVÝCH INAS/GAAS LASERŮ S ULTRATENKOU AKTIVNÍ OBLASTÍ

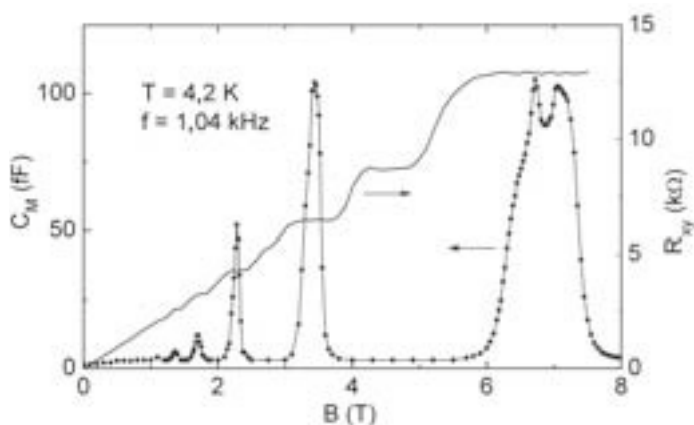
Toto téma je zajímavé jak aplikačně (snadno laditelné lasery v blízké infračervené oblasti), tak i teoreticky - potvrzení či vyvrácení představ italských teoretiků o novém mechanismu externí excitonové vazby na dvourozměrné ultratenké „kvantové jámy“.

TRANSPORT

V letech 1990 až 2002 jsme se ve skupině transportních jevů zabývali studiem vlivu hlubokých center na vlastnosti polovodičových struktur na bázi sloučenin typu $A^{III}B^V$ (GaAs InP, InAs, GaSb). Hlavními metodikami použitými při tomto výzkumu byly tzv. transienční spektroskopie (DLTS, PICTS) založené na analýze teplotních závislostí časové odezvy na proudový nebo světelný impuls. Odhalení původu a struktury hlubokých center umožnilo podstatně zdokonalit např. technologii GaSb - nového materiálu pro polovodičová čidla ekologicky významných plynů.

Blízko aplikacím byl i soustavný výzkum semiizolačních (SI) materiálů (SI-GaAs, SI-InP). Pomocí měření stejnosměrné a střídavé elektrické vodivosti byly prokázány rozličné mechanismy povrchového a objemového transportu náboje, jakož i existence dalekodosahových potenciálových fluktuací nevyhnutelně přítomných v těchto materiálech. Získané informace byly bezprostředně využity při konstrukci polovodičových detektorů ionizujícího záření (ve spolupráci s FJFI ČVUT a CERN Ženeva), v nichž bylo dále pomocí původní metodiky (určení potenciálového profilu pomocí elektronového mikroskopu) studováno rozložení prostorového náboje určujícího jejich účinnost.

K zajímavé problematice patřil i základní výzkum z hlediska fenomenologie velmi poučného porézního křemíku. Jeho pozoruhodné transportní



1/ Porovnání výsledků získaných z měření Hallova jevu R_{xy} a magnetokapacitní odezvy C_M

vlastnosti (závislost vodivosti na teplotě a vlhkosti) se ukázaly být přímým důsledkem netriviální (fraktální) geometrie povrchu tohoto materiálu.

Těžiště našeho zájmu ovšem leželo ve výzkumu nízkodimenzionálních struktur (kvantových jam) na bázi sloučenin $A^{III}B^V$. V těchto systémech, jejichž tloušťka (řádově nanometry) je srovnatelná s rozměrem elektronového vlnového klubka, v důsledku čehož je pak chování elektronového podsystemu určováno výhradně zákony kvantové mechaniky, je možno za nízkých teplot (< 4 K) pozorovat řadu neobvyklých jevů. Tak např. v kvantových jamách tvořených tzv. δ -vrstvami (atomárně tenké vrstvy legujících příměsí) byla nalezena anomální negativní magnetorezistence způsobená kvantovou interferencí parciálních elektronových vln a neočekávaná teplotní závislost elektrické vodivosti vznikající patrně v důsledku působení čistě kvantového efektu - tzv. nulových elektromagnetických fluktuací vakua. Kvantové jámy tvořené heteropřechody typu GaAs/GaAlAs, vykazující za nízkých teplot tzv. kvantový Hallův jev (KHE, projevující se na rozdíl od normálního Hallova jevu přítomností charakteristických plat (viz obr. 1), jejichž polohy jsou s naprostou přesností určeny univerzální konstantou h/e^2), byly zkoumány námi rozvinutou metodikou pronikání elektrického pole (EFP). Jak bylo ukázáno, kapacita dielektrické vrstvy obsahující uzeměnou kvantovou jámu je funkcí elektronové hustoty stavů v této jámě. Tuto veličinu lze z kapacitních měření určit s řádově vyšší přesností než z přímých měření KHE. Maxima magnetokapacitní odezvy (viz obr. 1) vykazují navíc ve vyšších magnetických polích v místech plat nápadnou strukturu, jejíž detailní rozbor ukázal, že chování elektronového plynu v režimu KHE má mnohé společné rysy s chováním kvantovaných vln v kapalném heliu [J. J. Mareš, J. Křištofik, P. Hubík: Phys. Rev. Lett. **82**, 4699 (1999)].

LUMINISCENCE

Skupina luminiscence oddělení polovodičů se zabývá luminiscenční a fotovodivostní spektroskopii polovodičových struktur s diskrétními energetickými stavy elektronů. Experimentální vybavení umožňuje studium emisních, absorpčních a fotovodivostních spekter v širokém spektrálním rozsahu 0,2-6 μm v teplotním oboru 2-300 K. Spektrometr SDL-1 s vysokým spektrálním rozlišením dovoluje studium vidové struktury záření polovodičových laserů. V roce 2003 bude zakoupen laditelný laser pro excitační spektroskopii, který umožní komplexní určení elektronové struktury studovaných nízkodimenzionálních polovodičových materiálů, ale i jiných pevnolátkových systémů s diskrétními energetickými spektry.

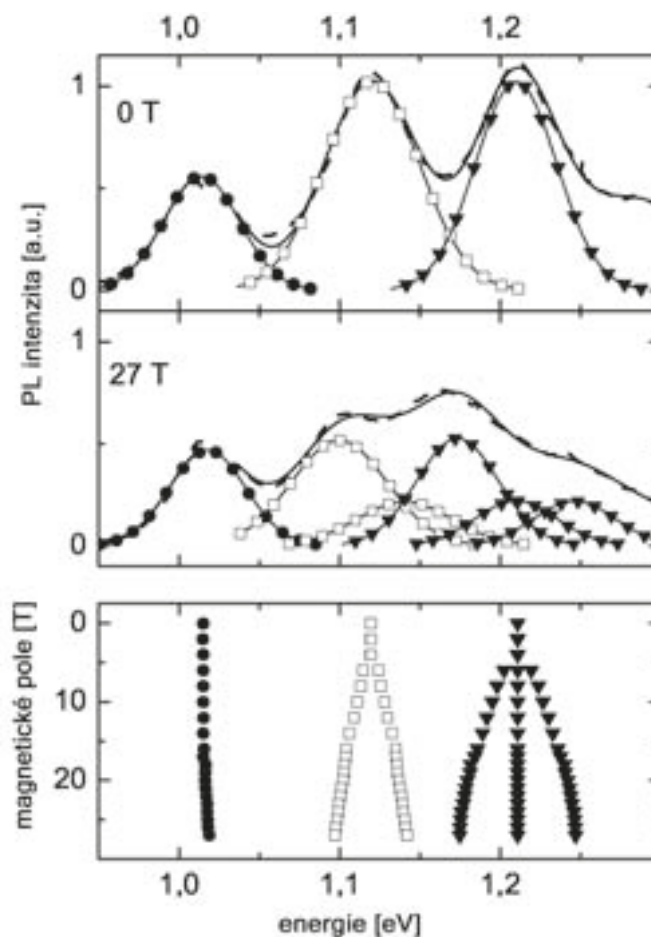
Původně byla práce skupiny zaměřena hlavně na studium luminiscenčních vlastností objemových polovodičů, především GaAs. Byla vyvinuta unikátní metoda luminiscenční topografie ke studiu homogenity rozložení mělkých příměsí a dislokací v substrátových deskách GaAs a studován vliv hlubokých příměsí např. EL2 center na optické a elektrické vlastnosti. V souvislosti s rozvojem technologií přípravy tenkých vrstev (epitaxe z kapalně fáze, z molekulárních svazků a z organokovů) na bázi polovodičů $A^{III}B^V$ se práce skupiny zaměřila na studium fotoluminiscence a elektroluminiscence tenkých polovodičových vrstev a struktur připravených na jejich základě. Z počátku to bylo především studium mělkých a hlubokých příměsí v tenkých polovodičových vrstvách. 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)].

Později s rozvojem nanotechnologií se práce skupiny plně orientovala na nízkodimenzionální systémy $A^{III}B^V$. Hlavními představiteli těchto systémů jsou polovodičové nanostruktury. Jsou to struktury, kde alespoň jeden jejich rozměr je srovnatelný s vlnovou délkou elektronu v polovodičích (~ 10 nm). Pro pohyb elektronu v krystalu totiž není možné použít klasický částicový přístup, ale kvantově mechanický, kde se elektron chová jako vlna a je popsán vlnovou funkcí. Pokud je omezen pouze jeden rozměr, hovoří se o kvantových jamách, při omezení dvou rozměrů o kvantových drátech a při omezení tří rozměrů o kvantových tečkách. Nejnázornější představa nízkodimenzionální polovodičové struktury je u kvantových jam, které jsou realizovány tak, že mezi vrstvy polovodiče s širším pásem zakázaných energií elektronů (bariéry) se umístí tenká vrstva materiálu (aktivní oblast) s užším pásem zakázaných energií elektronů a vytvoří se potenciálová jáma s diskrétními energetickými úrovněmi pro nerovnovážné nositele náboje. Energetické úrovně v potenciálové jámě lze měnit kromě chemického složení bariér a aktivní oblasti také její šířkou. Polovodičové nanostruktury patří mezi velmi perspektivní systémy pro moderní polovodičové součástky, mohou podstatně zlepšit jejich optické a elektrické vlastnosti. Díky lokalizaci nositelů v potenciálových jamách a velkému překryvu jejich vlnových funkcí je velká pravděpodobnost jejich zářivé rekombinace, proto je luminiscence efektivní a relativně dostupná metoda studia fyzikálních vlastností polovodičových nanostruktur.

Z mnoha nízkodimenzionálních polovodičových struktur jsme se specializovali na velmi tenké napanuté kvantové jámy InAs v GaAs a kvantové tečky

InAs v GaAs. U obou systémů se předpokládá aplikace pro optoelektronické součástky s velkou účinností do vysokých teplot. Tyto systémy jsou připravovány metodou MOVPE v oddělení polovodičů a proto máme unikátní možnost studia elektronové struktury v závislosti na technologických parametrech. Protože se jedná o velmi komplexní studium, používáme řadu velmi náročných experimentálních metod, jako například magnetoluminiscenci ve vysokých magnetických polích do 28 T. Tyto experimenty byly prováděny v laboratoři vysokých magnetických polí v Grenoblu. Jako příklad jsou na obrázku 2 ukázána luminiscenční spektra kvantových teček pro magnetické pole 0 a 28 T. Díky sejmutí degenerace je možné rozlišit S, P a D stavy kvantových teček. U S stavů je pozorován diamagnetický posuv s rostoucím magnetickým polem úměrný B^2 . P stav se štěpí na dva a D na tři luminiscenční pásy s rostoucím magnetickým polem.

Kromě toho se skupina zabývala i nanokrystalickou modifikací křemíku - porézním křemíkem. Porézní křemík představoval první systém na bázi křemíku s vysokou fotoluminiscencí. Byl prvním impulsem pro rozvoj optoelektroniky na křemíku, která by byla kompatibilní s křemíkovou elektronikou. Ve skupině luminiscence byl studován mechanismus fotoluminiscence a vliv podmínek přípravy na její účinnost. Byly připraveny elektroluminiscenční prvky na bázi porézního křemíku, ale s velmi malou účinností ve srovnání s komerčně vyráběnými svítícími diodami na bázi $A^{III}B^V$.



2/ Luminiscenční spektra struktur s kvantovými tečkami

STUDIUM POVRCHŮ A ROZHRANÍ

Pavel Svoboda, Tomáš Jungwirth

Oddělení povrchů a rozhraní Sekce pevných látek (<http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/>) vzniklo v dnešní podobě až v roce 1990. Spojilo se v něm několik pracovních skupin, které byly původně součástí jiných vědeckých oddělení FZÚ, resp. ÚFPL. Pojítkem byl úmysl věnovat se intenzivně tématice elektronových vlastností polovodičových vrstevnatých struktur s dvourozměrným elektronovým plynem, která je stále jedním z nejperspektivnějších oborů fyziky pevných látek, rozhodujícím impulsem pak instalace technologické aparatury KRYOVAK pro přípravu potřebných vzorků metodou tzv. epitaxy z molekulárních svazků (MBE - **M**olecular **B**eam **E**pitaxy). Tato unikátní aparatura, stále jediná svého druhu v ČR, byla zakoupena v r. 1989 a po diskusích uvnitř tehdejšího

Oddělení polovodičů vyčleněna k pěstování heterostruktur na bázi GaAs. Již v roce 1990 aparatura vyprodukovala první vzorky modulačně dotovaných heterostruktur GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ s dostatečně vysokou pohyblivostí nositelů řádu 10 T^{-1} (tj. $10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), na kterých mohlo být zahájeno také experimentální studium kvantového Hallova jevu (KHJ) a efektů s ním spojených.

Za těchto okolností tedy vzniklo dnešní Oddělení povrchů a rozhraní a to spojením tří pracovních skupin. První, převážně technologická, se základem a zkušenostmi s vakuovou technikou, vzešla s původního Oddělení vazeb a struktur ÚFPL a převzala do své péče provoz aparatury MBE. Druhá, specializovaná na základní výzkum fyziky povrchů, se oddělila od tehdejšího Oddělení