

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Czech Technical University in Prague
Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering

Doc. Ing. Eduard Hulcius, CSc.

Nanotechnologie a polovodičové kvantové tečky
Nanotechnology and Quantum Dots

Summary

This lecture - Nanotechnology and Quantum Dots – as the name suggests is composed of two parts. In the first part there is given a definition of nanotechnology, its importance, interdisciplinary overlap and fields of application are given. The second part is devoted to our concrete contribution to nanotechnology and nanocharacterisation. We have been preparing semiconductor nanostructures, starting from quantum wells to quantum dots (QDs) for more than twenty years.

QD preparation and characterisation are described in detail using six selected papers concentrating on our measurements of photoluminescence, magnetophotoluminescence, electroluminescence and ballistic electron emission microscopy and spectroscopy of QDs.

The lecture is based on the results of several tenths of papers published in scientific journals (works [I] to [XXXII]). Other important sources were invited and contributed lectures at many international conferences, universities and institutes, as well as experiences obtained during organising of many international conferences namely: IC MOVPE, EW MOVPE, MIOMD, Crystal Growth Conferences, ENF, NANOCON, etc.

Nearly all our research papers are written in English, however I have decided to write and present this work in the Czech language. A lecture written in Czech will be better used for my teaching and popularisation activities.

It is my great pleasure to confirm that the state of nano-research at the Czech Technical University has improved much since my habilitation in 2005. There was no good AFM/STM equipment available there at that time. Experimental nano-research and nano-education has improved fundamentally not only at Electro Engineering and Nuclear Faculties but through all CTU. I believe that it has been partly possible also due to my efforts.

Souhrn

Tato přednáška, jak její název „Nanotechnologie a polovodičové kvantové tečky“ napovídá, se skládá ze dvou částí. V první se pokouším definovat, co to je nanotechnologie, ukázat její význam, mezioborový rozsah a také její aplikační oblasti. Ve druhé části jsem se snažil popsat podrobněji náš konkrétní příspěvek k nanotechnologii a nanocharakterizaci. Již více než dvacet let připravujeme polovodičové nanostruktury – nejprve to byly kvantové jámy, později, od roku 1996, i kvantové tečky.

Na šesti vybraných pracích ukazují naše dosažené výsledky měření fotoluminiscence, magnetofotoluminiscence, elektroluminiscence a balistické elektronové emisní mikroskopie a spektroskopie na kvantových tečkách.

Přednáška byla vypracována na základě několika desítek prací publikovaných v impaktovaných i odborných časopisech (práce [I] až [XXXII]). Dalším významným zdrojem je dlouhá řada přednášek, které zahrnují zvané přednášky na konferencích a v různých ústavech AV ČR, přednášky na mnoha českých i zahraničních fakultách, dále na desítkách mezinárodních konferencí, pravidelně zejména na: IC MOVPE, EW MOVPE, MIOMD, Crystal Growth Conferences, ENF, NANOCON a mnoho dalších. Tyto práce zde neuvádím.

Prakticky všechny naše odborné práce a konferenční příspěvky jsou v jazyce anglickém, proto jsem se rozhodl tuto práci napsat a prezentovat v jazyce českém. Česky psaná práce bude také lépe využitelná v mé pedagogické a popularizační činnosti.

Je mým velkým potěšením konstatovat, že od mé habilitační přednášky v roce 2005 se situace nano-výzkumu na ČVUT podstatně zlepšila. Tehdy jsem hořce konstatoval, že na ČVUT není žádný kvalitní AFM/STM mikroskop. Dnes je technické vybavení mnohem lepší, je také zavedena výuka nanotechnologií a to nejen na FJFI a na FEL, ale i na jiných fakultách. Jsem rád, že je tomu tak snad i díky mému skromnému příspěvku.

Klíčová slova

Nanotechnologie, nanostruktury, nanoelektronika, epitaxní technologie, kvantové tečky, fotoluminiscence, elektroluminiscence, AFM, InAs, GaAs, polovodičové lasery a detektory, organokovová epitaxe - MOVPE.

Keywords

Nanotechnology, Nanostructures, Nanoelectronics, Optoelectronics, Epitaxial structures, Quantum dots, Photoluminescence, Electroluminescence, AFM, Semiconductor lasers and detectors, Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, Indium Arsenide, Gallium Arsenide.

Obsah přednášky

- 1. Obecně o nanotechnologiích a nanostrukturách**
 - 1.1 Definice nanotechnologie a nanostruktur
 - 1.2 Historie a vývoj nanotechnologií
 - 1.3 Nanotechnologické obory a aplikace nanostruktur
 - 1.4 Význam a financování nanotechnologií

- 2. Polovodičové kvantové tečky**
 - 2.1 Fyzikální podstata kvantových teček
 - 2.2 Způsoby přípravy QD, včetně in-situ diagnostiky
 - 2.3 Struktura kvantových teček
 - 2.4 Charakterizace kvantových teček
 - 2.5

- 3. Stručný popis vybraných projektů a výsledků naší laboratoře v oboru QD**
 - 3.1 Laterální tvar InAs/GaAs kvantových teček ve vertikálně korelovaných strukturách
 - 3.2 Tvar InAs/GaAs QD určený z magnetofotoluminiscence
 - 3.3 InAs kvantové tečky v AlGaAs/GaAs heterostruktuře studované pomocí balistické elektronové emisní spektroskopie
 - 3.4 Povrchové procesy během růstu InAs/GaAs kvantových teček monitorované reflektanční anizotropickou spektroskopií
 - 3.5 Vliv ternárních InGaAs a GaAsSb vrstev redukujících napětí a pokrývajících kvantové tečky

- 4. Literatura**
 - 4.1 Citovaná v této práci
 - 4.2 Přehled vlastních publikovaných QD prací: 1998 – 2011
 - 4.3 Seznam grantových projektů spojených s QD

- 5. Životopis**

1. Obecně o nanotechnologiích a nanostrukturách

1.1 Definice nanotechnologie a nanostruktur

Wikipedie [1] uvádí:

Nanotechnologie je studium ovládání hmoty na atomární a molekulární úrovni. Obecně se nanotechnologie zabývá strukturami o velikosti 100 nanometrů nebo menšími, alespoň v jedné dimenzi (směru) a zahrnuje také vývoj materiálů této velikosti. Za nanotechnologii můžeme považovat něco, co splňuje níže uvedená tři kritéria.

První kritérium

Nanotechnologie je výzkumná činnost nebo technologický vývoj provozovaný na atomární, molekulární nebo makromolekulární úrovni v rozsahu přibližně jednotek až stovek nanometrů. V některých případech ovšem rozumíme nanotechnologii i činnost, která manipuluje i s útvary o velikosti až několika mikrometrů.

Druhé kritérium

Při těchto činnostech se musí vytvářet nebo používat struktury, zařízení nebo systémy, které mají nové vlastnosti a funkce vyplývající mimo jiné právě z jejich malé velikosti. Tedy musíme přijmout skutečnost, že na nanoúrovni se částice a vytvářené struktury chovají jinak než v makrosvětě. Je to dáno mimo jiné tím, že hlavními faktory, které ovlivňují chování nanočástic, jsou atomární síly, vlastnosti chemických vazeb a hlavně kvantové jevy.

Třetí kritérium

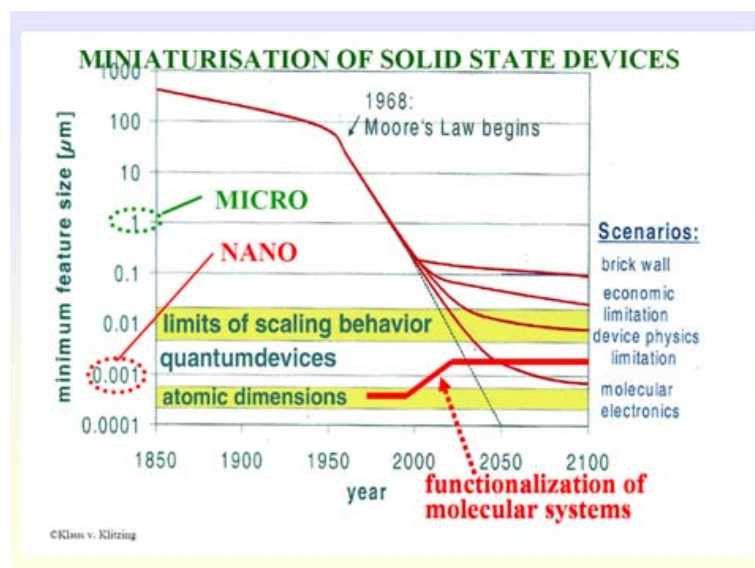
Za nanotechnologický postup je možné označit pouze takovou metodiku, která umožňuje z nanočástic vytvářet funkční systémy a celky. Tyto celky také musíme být schopni objektivními postupy jejich funkčnost nastavovat, kontrolovat a regulovat tzn., musíme být schopni s nimi manipulovat.

Tato definice i kritéria jsou dosti obecná, ale v podstatě správná. Můžeme je však klidně vztáhnout i na starobylé čínské práce s barvením pomocí nanočástic zlata, či na Lykurgův pohár ze starého Říma. Námitka, že tehdy nic netušili o kvantové fyzice, neobstojí, neboť ani my dnes jí úplně nerozumíme a není bezesporně zařazena do celkového fyzikálního poznání (souvislost s relativistkou, gravitací či třeba s biologií mozku). Při práci se studenty je třeba upozornit i na tento přesah do minulosti, neboť nanotechnologie nezačíná slavnou Feynmanovou větou z padesátých let ani kvantovou fyzikou z počátku 20. století.

Například výše zmíněný objev barvení skla přísadou malého množství zlatého nanoprášku byl přisuzován německému skláři Johannu Kunckelovi, který žil v 17. století, ale zjevně se jedná o mnohem starší techniku, která je ukázkovým příkladem nanotechnologie: „Proměnlivé zbarvení pohárů souvisí s neobvyklou vlastností zlata (i stříbra a mědi),

kteřou se liší od většiny ostatních kovů. Elektrony jsou v atomové mřížce volně pohyblivé a na povrchu kovu tvoří při dopadu vlny světla vlny podobné vlnám na hladině vody. U alkalických kovů a mědi, stříbra či zlata zasahují do viditelné oblasti, což dává těmto kovům jejich typické teple bílé, nažloutlé až růžové zbarvení. Kovové nanočástice jemně rozptýlené ve skle nebo v roztoku či kovové nanofólie naopak prosvítají živými barvami: hnědě (Ag), zeleně (Cu) až rubínově (Au). Elektrony na povrchu těchto atomů přenášejí elektromagnetické pole podobně jako fotony světlo. Těmto vlnám se říká povrchové plasmony.“ [2].

Velmi důležité je zdůraznit, že například nanoelektronika není pouhé pokračování (zmenšování) mikroelektroniky, ale její výrazná změna, která přináší nové jevy (kvantové fyziky) a tím i nové aplikace. Velmi dobrým příkladem je pohled na miniaturizaci polovodičových nanostruktur (paměti, procesorů apod.), viz obr. 1.



Obr. 1. Nanostruktury a Mooreův zákon [3].

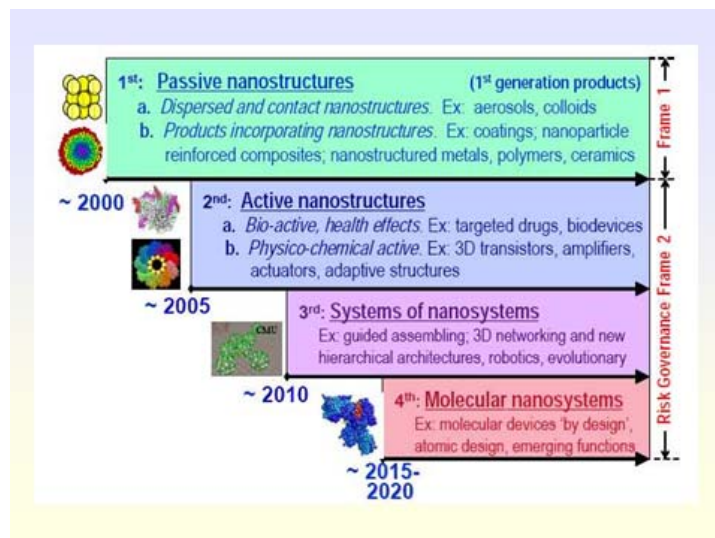
1.2 Historie a vývoj nanotechnologií

Počátek historie nanotechnologií se obvykle datuje od padesátých let 20. století a je spojován s osobou amerického fyzika Richarda Feynmana. Tento americký fyzik položil vědeckému světu otázku: “Proč ještě neumíme zapsat všech dvacet čtyři svazků Encyklopedie Britanniky na špendlíkovou hlavičku?” Richard Feynman vystoupil v roce 1959 na zasedání American Physical Society na CALTECHu s přednáškou s názvem “There’s Always Room at the Bottom”, (podle některých pramenů byl název přednášky

"There's Plenty of Room at the Bottom" [4].) V této přednášce předložil vizi, která se později stala skutečností a novým oborem fyziky, vizi nanotechnologií. Uvedl představu o tom, že bude možné vytvářet materiály a mechanismy na úrovni atomů a molekul. Pozdější vývoj v 80. letech mu dal za pravdu. V roce 1981 byl vynalezen rastrovací tunelový mikroskop (STM), roku 1986 mikroskop využívající atomových sil (AFM) a v roce 1989 pak inženýři firmy IBM napsali třiceti pěti izolovanými xenonovými atomy pomocí tunelového skenovacího mikroskopu logo své firmy.

Japonský vědec Norio Taniguchi z Tokijské univerzity použil v roce 1974 jako první termín "nano-technology" [5]. Jeho definice pro depozici tenkých polovodičových filmů: „Nanotechnologie je hlavně tvorba, separace, skládání a deformace materiálů na úrovni atomů či molekul,“ je dnes již z obecného hlediska poněkud zastaralá, nicméně pro mnoho oborů stále platí.

Stávající představa o klasifikaci a vývoji nanosystémů je na obr. 2.



Obr. 2. Klasifikaci a vývoji nanosystémů [6].

1.3 Význam a financování nanotechnologií

Americká National Nanotechnology Initiative zahájená prezidentem Billem Clintonem byla v roce 2000 financovaná 500 miliony dolarů [7, 8], za prezidenta G. W. Bushe v roce 2003 to byly 3,63 miliardy na další čtyři roky a v roce 2009 dosáhla výše podpory 1,5 miliardy dolarů na rok [9].

Evropská komise připravila ke schválení pro Evropský parlament návrh na financování nanotechnologického výzkumu pro roky 2010-2015 ve výši 2 miliard EUR [6]. Jedná se o podporu projektů ve velmi širokém

spektru nanotechnologických oborů, nicméně byla provedena výrazná selekce s ohledem na evropské možnosti, konkurenceschopnost a hlavně význam pro evropskou ekonomiku. Silná podpora nanotechnologií je i v jednotlivých evropských zemích, zejména v Německu, Spojeném království a Francii.

Ještě výraznější podpora a rozmach nanotechnologií je ve všech zemích východní Asie, kde se nyní realizuje drtivá většina nanoprodukce a část jejich zisků jde i do výzkumu, který tím získává řádově větší podporu než jinde ve světě. Na nanotechnologie začíná sázet, jako na perspektivního nástupce ropy, i Saudská Arabie.

Český národní program „Nanotechnologie pro společnost“, na jehož tvorbě jsem se také podílel, přinese v letech 2008-2013 do nanotechnologického výzkumu zhruba 1 miliardu korun. Velmi malá část je určena základnímu výzkumu, převážná část jde do aplikovaného výzkumu a menší část je určena i pro podniky, na jejichž spoluúčast a spolufinancování musí být většina projektů vázána. Škoda, že v roce 2010 nevyšel společný projekt AV ČR a ČVUT na založení Ústavu aplikovaných věd, jehož podstatnou částí měl být právě výzkum nanostruktur a nanotechnologií.

1.4 Nanotechnologické obory a aplikace nanostruktur

Obávám se, že nanotechnologii nelze zavést jako samostatný obor, jako se to děje v řadě případů, kdy se nové vědní (a výukové) obory odštěpí od zavedených vědních disciplin, osamostatní svůj předmět zkoumání a vytvoří vlastní terminologii. Nanotechnologie vznikla vlastně spojením řady oborů, nebo lépe řečeno prohloubením či rozšířením jejich předmětu studia. I terminologii nanotechnologie spíše přebírá. Základním nástrojem popisu a výkladu je (tam kde nanotechnologie není pouhým zmenšováním) již etablovaná kvantová fyzika.

Nanotechnologie jako výrobní nástroj, předmět činnosti či studia, stejně jako vlastní nanočástice a nanostruktury, dnes prochází napříč prakticky všemi přírodovědeckými a technickými obory. Leží v základech fyziky, chemie, biologie, materiálového inženýrství. Její produkty používá strojírenství, stavebnictví, elektronika, medicína, energetika, automobilový průmysl a další odvětví.

Často se hledá nanotechnologické „horizontal issue“, něco co by spojovalo všechny nanoobory. Obávám se, že to není:

- ani fyzika:

Kvantová mechanika je sice pro pochopení většiny dějů na nanoúrovni podstatná, ale pro nanobiologii či nanomedicínu zatím příliš složitá a pro jiné obory jako strojírenství či nanostavebnictví zbytečná.

- ani nanoriziko, nanobezpečnost, či nanoetika:

Je to vysoce důležitý obor, některé nanočástice mohou být smrtelně nebezpečné (azbest, zplodiny naftových motorů apod.), ale některé

nanostruktury či nanočástice nejsou a ani nemohou být nebezpečné jako nanočástice samy o sobě a ani jako prvky, z kterých jsou složeny. Předpis o uvádění obsahu nanomateriálů v různých produktech se sice může zdát správný, ale vzhledem k tomu, že vše hmotné je pravděpodobně složeno z nanočástic (atomů), zdá se mi být nesmyslný. Riziko nanomateriálů existuje a nesmí být podceňováno, ale nelze je paušalizovat. Je to asi podobné jako s chemií.

- ani nanovýuka:

Výuka nanotechnologií v plném rozsahu není možná vzhledem k nedostatečné mozkové kapacitě učitelů i žáků. Jednotlivé obory mají a musí mít různé přístupy k poznávání a sjednocující teorie není vidět ani na horizontu. Nanotechnologie spíše vyrůstá na základech jednotlivých oborů, což je sice omezující, ale asi nezbytné,

- snad může být jednotící pouze nanocharakterizace:

Každý potřebuje vědět, jak je nanostruktura či nanočástice, která je předmětem jeho zájmu, veliká a jak vypadá. Tomu také odpovídá bouřlivý rozvoj nanocharakterizačních metod a technik. Jsou to metody sondové (hrotové), elektronové, rentgenové i optické (navzdory relativní velikosti fotonů). Jen v práci [10] jsou uvedeny desítky variant sondových charakterizačních technik.



Obr. 3. Aplikace nanostruktur [6].

Aplikace nanostruktur dnes zasahuje snad do všech oborů lidské činnosti. Zde uvádím alespoň malý obrázkový přehled podle [6].

Mnohastránkový přehled oborů, kde se v Evropě nanotechnologie a nanostruktury využívají, je například uveden v práci [6]. Neúplný a ne

zcela aktuální přehled pracovišť, oborů a projektů v České republice je uveden v publikaci [11], jejíž aktualizace bude velmi náročná. Zde se omezím na popis, vysvětlení funkce a uvedení aplikací z oblasti polovodičových nanostruktur nazývaných kvantové tečky.

2. Polovodičové kvantové tečky

Je třeba si uvědomit, že vedle velkého množství nanokrystalů z různých materiálů existují dva strukturně podobné, ale principiálně odlišné typy polovodičových kvantových teček (QD). Volné nanokrystal, také označované jako QD, které se většinou připravují chemickými cestami, např. metodou sol-gel, nebo třeba i jen jemným mletím je popsáno výše (např. Au nanočástice). Pak se také nyní široce využívají polovodičové volné QD tvořené dvěma materiály s různou šířkou zakázaného pásu (jádro a obal), které mohou uvnitř zachytit a udržet elektrony a díry. Tyto se používají hlavně v lékařské diagnostice. Využívá se jejich miniaturnost (snadno proniknou do všech orgánů, v některých se hromadí – např. v nádorech), mají schopnost navázat na povrch polymery či proteiny a hlavně mají velmi vysokou účinnost zářivé luminiscence. Zadáme-li do internetového vyhledávače „polovodičové kvantové tečky“, objeví se na prvních stranách především tyto volné QD.

Tato přednáška bude ovšem věnována klasickým QD, které jsou také připraveny nejméně ze dvou typů materiálů, ale jsou pevně a krystalograficky dokonale zakotveny (zarostlé) v příslušné laserové či detektorové polovodičové heterostruktuře.

2.1 Fyzikální podstata kvantových teček

Na rozdíl od pásové struktury pevných látek se v kvantových tečkách objevují elektronové energetické hladiny, podobné těm atomárním, viz obr. 4. Z hlediska pásové („hladinové“) struktury se kvantové tečky neliší od kvantových rovin či drátů – vykazují lepší monochromaticnost, podstatné je však nejen další zmenšení aktivního objemu struktur (jednoelektronové či jednofotonové zdroje), ale i jiná hustota stavů (viz obr. 5) a s tím spojené vlastnosti součástek jako je např. lepší teplotní stabilita.

2.2 Způsoby přípravy kvantových teček, in-situ diagnostika

Základy epitaxních polovodičových nanotechnologií:

Epitaxní vrstvy a heterostrukтуры, krystalograficky mnohem kvalitnější než objemové monokrystal, díky růstu při nižších teplotách, lze připravovat řadou epitaxních metod – kapalnou, pevnolátkovou a plynnou epitaxí. Pro přípravu QD jsou rozhodující plynné epitaxe – epitaxe z molekulárních svazků (MBE) a organokovová epitaxe (MOVPE).

Atom - Pevná látka - Kvantová tečka

1.2 Paradigm Changes in Semiconductor Physics and Technology

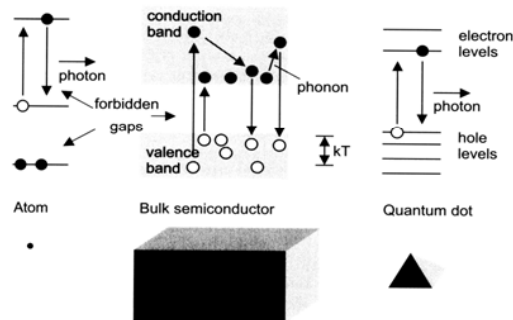


Fig. 1.4. Schematic representation of energy levels in a single atom, a bulk semiconductor and a quantum dot

Obr. 4. Elektronové struktury různých objektů, znázorněných dole [12].

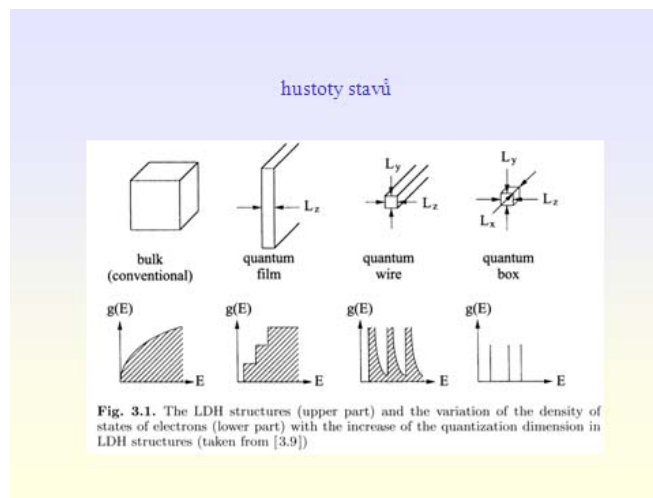


Fig. 3.1. The LDH structures (upper part) and the variation of the density of states of electrons (lower part) with the increase of the quantization dimension in LDH structures (taken from [3.9])

Obr. 5. Vliv dimenze objektu na hustotu stavů [13].

Princip epitaxního růstu:

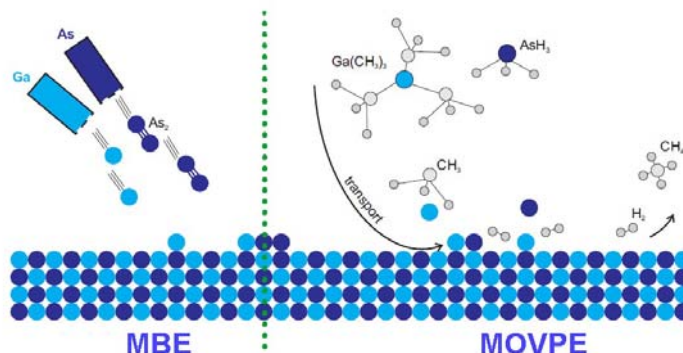
Název epitaxe, podle řeckého epi-taxis ("uspořádaně na"), zavedl Louis Royer v roce 1936. Jde o krystalický růst na (obvykle) monokrystalické podložce. Při rozdílu mřížkových konstant (obvykle) větším než 15% růst přestává být epitaxním.

Atomy či molekuly látky, kterou chceme epitaxně deponovat na vhodný substrát, se dopraví na jeho povrch, ten ovšem musí být atomárně čistý (zbaven oxidů a různých adsorbovaných látek) a atomárně hladký

(maximálně s atomárními schody danými rozorientací monokrystalu). Na jeho povrchu dojde nejprve k fyzisorpci, pak na vhodných místech s minimem energie k chemisorpci jednotlivých atomů, k růstu atomárních vrstev a postupně celé struktury. Srovnání principu MBE a MOVPE je znázorněno na obr. 6. Proces růstu MOVPE je znázorněn na obr. 7.

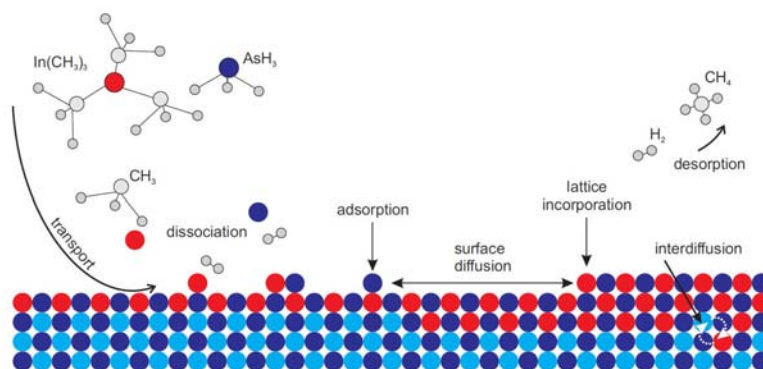
Plynná epitaxe z organokovových sloučenin

MOVPE je základní technologií, kterou jsme používali při přípravě materiálů popisovaných v této přednášce. MOVPE je nejen důležitá



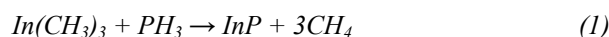
Obr. 6. Znázornění depozice GaAs pomocí technik MBE a MOVPE [14].

badatelská, ale i zásadní průmyslová technologie. Umožňuje totiž velkoplošnou kvazikontinuální výrobu struktur z většího množství různých materiálů. Její princip je na obr. 7, kde je znázorněn růst InAs monovrstvy na GaAs substrátu z trimetyliindia ($(\text{CH}_3)_3\text{In}$) a fosfinu (PH_3).

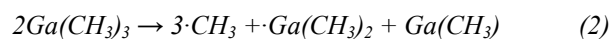


Obr. 7. Fyzikální a chemické procesy během růstu InAs monovrstvy na GaAs substrátu pomocí technologie MOVPE [14].

Tento proces popisuje sumární rovnice:



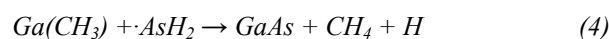
Přesnější popis je složitější. Například pro podobný růst arsenidu gallitého GaAs (viz obr. 6) se trimethylgallium (TMGa) nejprve termicky rozkládá na dimer a monomer (2):



arsin se rozkládá a z metylové skupiny vzniká metan (3):



a pak teprve na povrchu vznikne GaAs (4):



Tyto reakce neprobíhají ve vakuu (jako fyzikální depozice GaAs při MBE procesu), ale v atmosféře vodíku při tlaku (2 až 100 kPa).

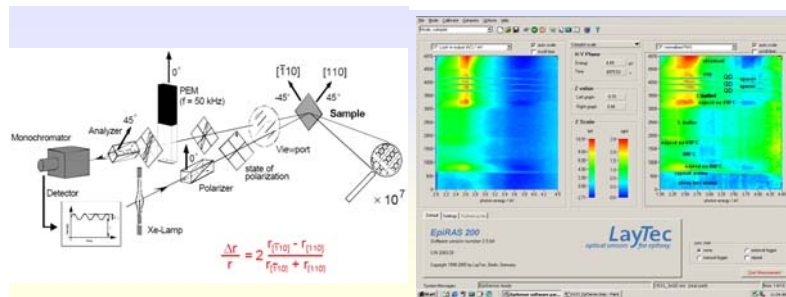


Obr. 8. a) Fotografie MOVPE aparatury Aixtron 200, b) Nerezová nádobka (bubler) na organokovy, c) schematicky znázorněné některé organokovové molekuly používané pro MOVPE růsty.

Naše MOVPE aparatura AIXTRON 200, kterou jsme získali zdarma díky zbrojní konverzi německé firmy MBB, je jediná komerční v ČR. Nová by stála kolem milionu EUR. Růstové prekursory, jejichž jedno balení stojí několik set tisíc korun, získáváme většinou zdarma přímo od výrobních firem, díky tomu, že pro ně přesně měříme tenzi par těchto prekursorů.

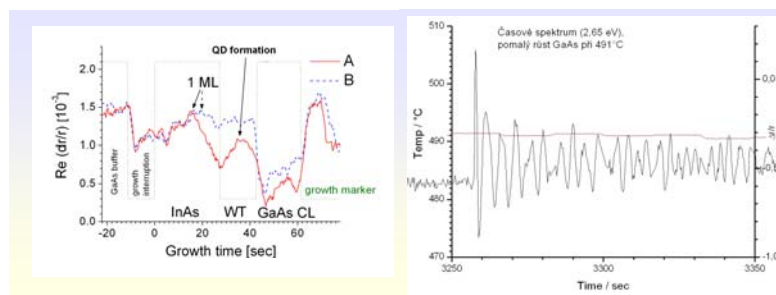
In-situ monitoring při MOVPE

Aparaturu na měření reflektanční anizotropické spektroskopie (RAS) jsme zakoupili od firmy LayTec, přizpůsobili jsme naši MOVPE aparaturu, zvládli techniku měření a pokoušíme se správně interpretovat poměrně složitá RAS měření. Tato aparatura též umožňuje přesná a věrná „true temperature“ měření teploty, jednoho ze základních parametrů epitaxních technologií. Na obr. 9 je schéma této aparatury a výsledky měření RAS ve formě „color plot“ při růstu tří InAs rovin s QDs.



Obr. 9. a) Schéma aparatury na měření RAS [14], b) výsledky měření při růstu struktury s třemi rovinami s QDs.

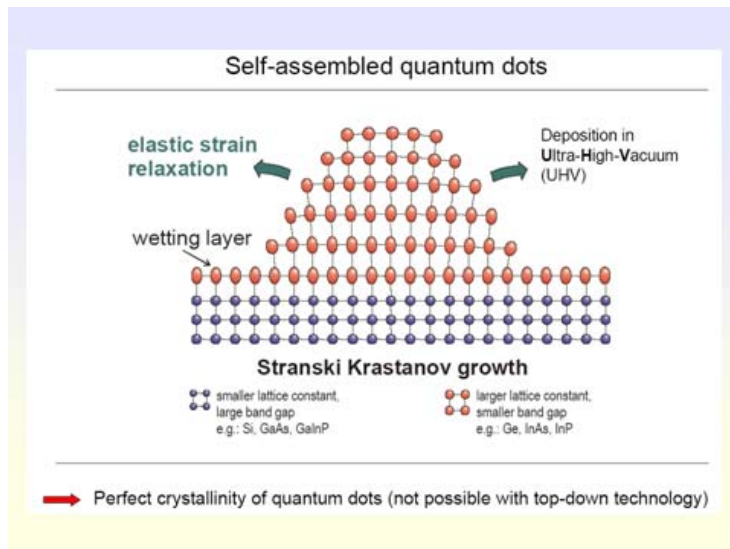
Na obr. 10 je v modu „time resolved“ signál RAS pro energii odražených fotonů 2,65 eV, při růstu jedné roviny InAs QD v GaAs. Na tomto obrázku jsou dva růsty, jeden úspěšný (červený), druhý vzorek neměl luminiscenci (modrý). Z RAS signálu vidíme, proč se to stalo – nevyvinuly se QD. Vpravo na obr. 10 je růst čistého GaAs za podmínek, kdy vidíme monovrstvové oscilace – kolísání RAS signálu při růstu jednotlivých atomárních vrstev. To umožňuje přesně určit rychlost růstu.



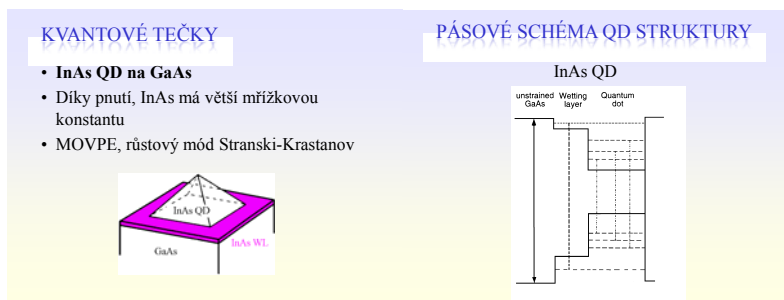
Obr. 10. a) průběh růstu InAs vrstvy s kvantovými tečkami (vrstva je silně něco přes jednu atomární rovinu) obklopenou vrstvami GaAs, b) Monoatomární oscilace při růstu GaAs. RAS ve FZÚ AV ČR, v. v. i.

2.3 Struktura kvantových teček

Kvantové tečky vznikají samovolně, když narosteme velmi tenkou vrstvou polovodiče (1,5 – několik monovrstev) s trochu větší mřížkovou konstantou než má podložka, viz obr. 11. Při určité tloušťce „smáčecí“ vrstvy a při vhodných povrchových energiích materiálů je energeticky výhodnější, když se atomy z druhé vrstvy seskupí na sebe a nevytváří silně napnutou druhou vrstvu. Tento typ růstu epitaxní struktury se nazývá Stanského-Krastanovův typ růstu. Někdy QDs mohou vzniknout i bez smáčecí vrstvy, potom mluvíme o Volmer-Weberově typu růstu.



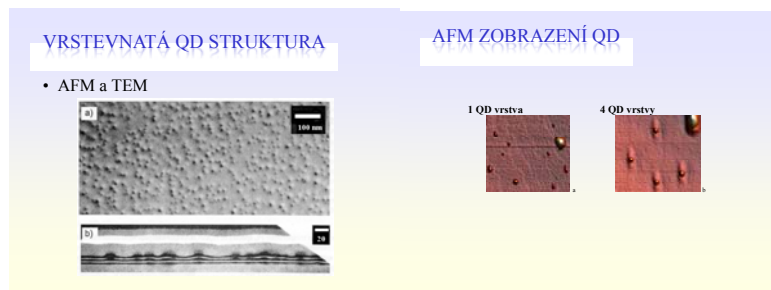
Obr. 11. Vznik kvantových teček při Stanského-Krastanovově typu růstu.



Obr. 12. a) Jiný schematický pohled na QD a b) kvantové hladiny pro elektrony a díry uvnitř QD.

Na obr. 12 je schematický 3D pohled na jednu QD a vpravo je pásová/hladinová energiová struktura pro elektrony a díry uvnitř QD.

Na obr. 13a jsou zviditelněny struktury našich QDs pomocí transmisní elektronové mikroskopie (TEM – vlevo dole), konkrétně boční pohled na tři roviny QDs. Vlevo nahoře pohled na tutéž strukturu shora pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM), podobná měřítka. Na obr. 13b jsou AFM pohledy shora na QD struktury - vlevo s jednou rovinou QDs a vpravo se čtyřmi vrstvami QDs. Je vidět, že ve vícevrstvých strukturách tečky rostou nad sebou a jejich homogenita se zlepšuje.



Obr. 13. a) nahoře pohled strukturu QD z povrchu – AFM, vlevo dole – boční pohled na tři roviny QD - TEM – podobná měřítka, b) QD struktury - vlevo s jednou rovinnou s QD a vpravo se čtyřmi vrstvami QD.

2.4 Charakterizace kvantových teček

Vlastnosti námi připravených QDs byly měřeny nejen ve FZÚ, ale i na mnoha spolupracujících pracovištích. Jak v rámci neformální spolupráce, tak i při řešení mnoha grantových projektů – viz seznam na str. 29.

Luminiscenční měření jsou pro nás zásadní. Měřili jsme fotoluminiscenci (PL) při pokojové teplotě (nejhorojnější měření) i při nízkých teplotách. PL je nenahraditelná při optimalizaci (intenzita PL, vzdálenost kvantových hladin a vůbec celém spektrum) a ladění (vlnová délka) vlastností QDs. Dále jsme měřili elektroluminiscenci (EL), což je netriviální měření, které vyžaduje nutnost přípravy komplikovanějších struktur, ale je zásadní pro aplikace. V Grenoblu v High Field Mag. Lab. jsme také měřili magnetofotoluminiscenci (MPL), což byla průkopnická měření, důležitá pro pochopení vnitřní struktury QD viz str. 19, 20.

Využívali jsme informace o velikosti QD, tloušťce a složení vrstev i pnutí ve struktuře získané z měření RTG difrakce a reflexe uskutečněných v rámci různých projektů s PŘF MU, MFF UK i ve FZÚ.

Pro charakterizaci nanostruktur obecně a QD zvláště, jsou nezbytné mikroskopické metody. Používali jsme elektronové i hrotové. Obrázky

získané díky těmto metodám jsou uvedeny prakticky ve všech našich publikacích včetně této práce. Výsledky mikroskopie atomárních sil (AFM) jsou na str. 17, 19, 22. Zobrazit QD pomocí řádkovací tunelové mikroskopie (STM) se nám nepodařilo, získali jsme jen obrázky smáčecí vrstvy (WL) a krycích vrstev (CL). Několik pěkných bočních pohledů na QD struktury jsme pořídili pomocí transmisní elektronové mikroskopie (TEM) – str. 17. Celkový pohled na strukturu s QDs jsme získávali i pomocí řádkovací elektronové mikroskopie (SEM).

Zajímavá kombinace mikroskopického a transportního měření je Balistická elektronová emisní mikroskopie a spektroskopie (BEEM/BEES), kterou vyvinuli kolegové v ÚFE AV ČR, v. v. i. Pro tato měření jsme připravovali speciální AlGaAs/GaAs heterostrukturu, v níž byly InAs/GaAs QD zarostlé. Měření BEEM/BEES jsou popsána na str. 21 a 22.

3. Stručný popis vybraných projektů a výsledků naší laboratoře a našich spolupracovníků v oboru QD

Soubor prací uvedených v tomto odstavci by se dal shrnout do názvu “Growth and properties of InAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs quantum dot structures”. Mají celou řadu spoluautorů, jimž bych zde chtěl poděkovat.

Jsou jimi:

J. Pangrác¹, A. Hospodková¹, K. Melichar¹, T. Šimeček¹, J. Vyskočil^{1,3}, J. Oswald¹, K. Kuldová¹, V. Vorlíček¹, J. Zeman¹, O. Petříček¹, T. Mates¹, I. Drbohlav¹, J. Walachová², J. Vaniš², J. Zelinka², V. Malina², F. Šroubek², P. Hazdra³, J. Voves³, M. Atef³, V. Komarnitsky³, J. Humlíček⁴, V. Krápek^{4,1}, D. Munzar⁴, O. Caha⁴, K. Navrátil⁴, M. Lorenc⁴, O. Bonaventurová-Zrzavecká⁴, J. Toušková⁵, E. Samochin^{1,5}, D. Kindl^{5,1}, G. Lippold, V. Riede, S. Jullian, M. Potemski, M. Henini
¹FZÚ AV ČR, v.v.i., ²ÚFE AVČR, v.v.i., ³FEL ČVUT, ⁴PřF MU, ⁵MFF UK.

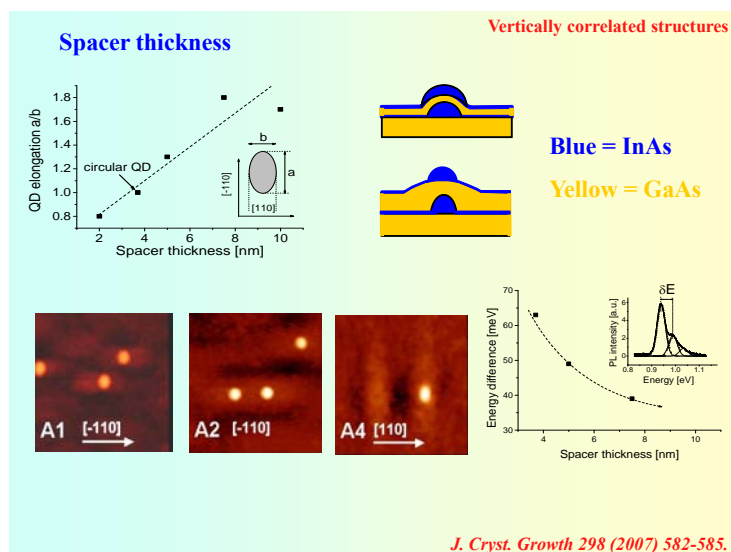
Zde se pokusím popsat některé zajímavé výsledky z posledních let.

3.1 Laterální tvar InAs/GaAs kvantových teček ve vertikálně korelovaných strukturách

[XII] Lateral shape of InAs/GaAs QDs in vertically correlated structures
A. Hospodková, E. Hulicius, J. Oswald, J. Pangrác, T. Mates, K. Kuldová, K. Melichar, and T. Šimeček, J. Cryst. Gr. 298 (2007) 582-5.

Na obr. 14 je popsáno, jak jsme pomocí tloušťky oddělovací vrstvy rovin QDs řídili vzdálenost mezi fotoluminiscenčními píky danými vzdáleností mezi základním a prvním excitovaným stavem v QD. Tato tloušťka totiž

výrazně ovlivňuje tvar QD, na němž zase závisí vnitřní elektronová a děrová struktura v QD. V této práci jsme též popsali, jak závisí emitovaná vlnová délka na počtu rovin kvantových teček.



Obr. 14. Změna tvaru QD v závislosti na tloušťce oddělovací vrstvy. Vpravo nahoře je vysvětlující schéma, vlevo je závislost tvaru QD na tloušťce oddělovací vrstvy určená z obrázků AFM. Tímto tvarem je dána vzdálenost mezi základním a prvním excitovaným stavem v QD.

3.2 Tvar InAs/GaAs QD určený z magnetofotoluminiscence

[IX] Elongation of InAs/GaAs quantum dots determined from magnetophotoluminescence measurements

V. Krápek, K. Kuldová, J. Oswald, A. Hospodková, E. Hulicius, J. Humlíček, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 153108.

Na obr. 15 jsou vypočtené závislosti rozštěpení různých elektronových kvantových hladin v QD v závislosti na magnetickém poli pro různé tvary QD. Rozštěpení a posun energiových hladin je dán hlavně efektivní hmotou excitonů. Tento efekt může být použit pro určení efektivní hmoty i tvaru (protažení) QD.

Na obr. 16 je ukázka toho, jak jsou do teoretických výpočtů zanesena naše experimentální MPL data. Z fitování našich experimentálních výsledků na teoretické závislosti rozštěpení kvantových hladin kvantové tečky v magnetickém poli (měřili jsme až do 26 T!) lze určit parametry QD.

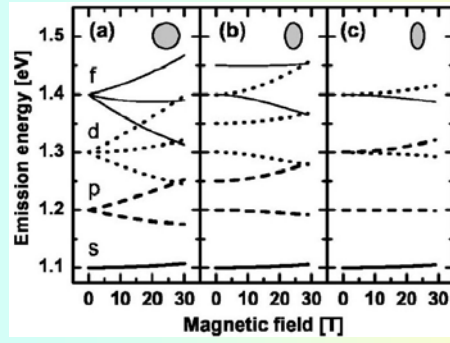


Fig. 1 MPL energies calculated for a) circular and b), c) elongated QDs. Parameters used in the calculations: $m^* = 0.045m_0$, $\hbar\omega_x = 100$ meV, a) $\hbar\omega_y = 100$ meV ($L = 1:0$), b) $\hbar\omega_y = 150$ meV ($L = 1:5$), c) $\hbar\omega_y = 200$ meV ($L = 2:0$). The energies of the lowest transition at zero field were set to 1.1 eV (corresponding to the vertical confinement energy).

Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 153108.

Obr. 15. Teoretické závislosti rozštěpení QD elektronových kvantových hladin v magnetickém poli závislosti na tvaru QD.

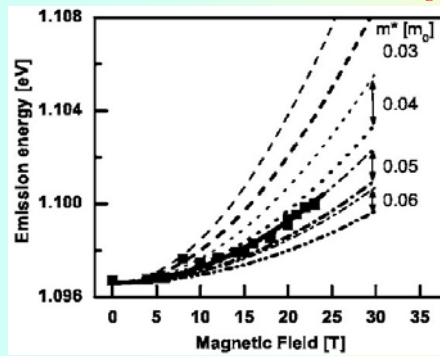


Fig. 2 Energy of the lowest MPL transition against magnetic field for elongated QDs. The experimental values (squares) and calculated energies with parameters $\hbar\omega_x = 100$ meV, $\hbar\omega_y$ going from 100meV (thinner lines) to 200meV (thicker lines), and effective masses $0.03m_0$ (dashed), $0.04m_0$ (dotted), $0.05m_0$ (dash dotted), $0.06m_0$ (dash dot dotted), indicated by the arrows. **The best agreement with the experimental data has been obtained for $\hbar\omega_y = 160$ meV and $m^* = 0.045m_0$ (thick solid line).**

Appl. Phys. Lett. 89 (2006), 153108.

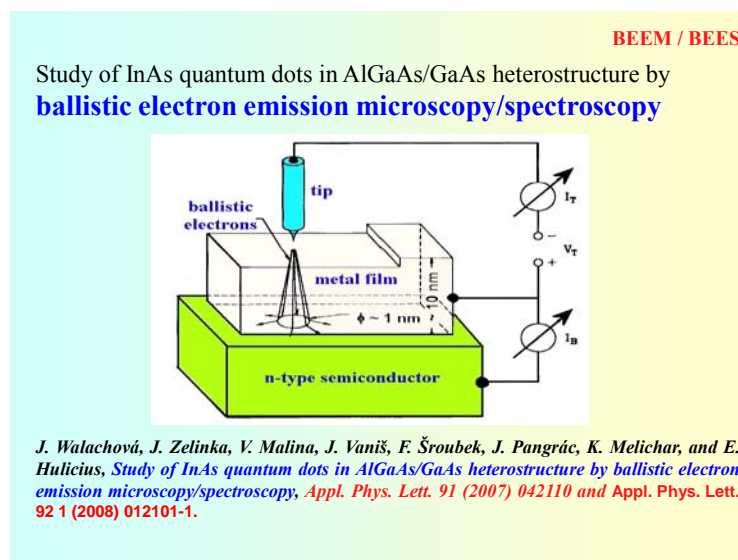
Obr. 16. Z fitování našich experimentálních výsledků na teoretické závislosti rozštěpení kvantových hladin v mg. poli lze určit parametry QD.

3.3 InAs kvantové tečky v AlGaAs/GaAs heterostruktuře studované pomocí balistické elektronové emisní spektroskopie

[XIV] Study of InAs quantum dots in AlGaAs/GaAs heterostructure by ballistic electron emission microscopy/spectroscopy

J. Walachová, J. Zelinka, V. Malina, J. Vaniš, F. Šroubek, J. Pangrác, K. Melichar, and E. Hulicius, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 042110.

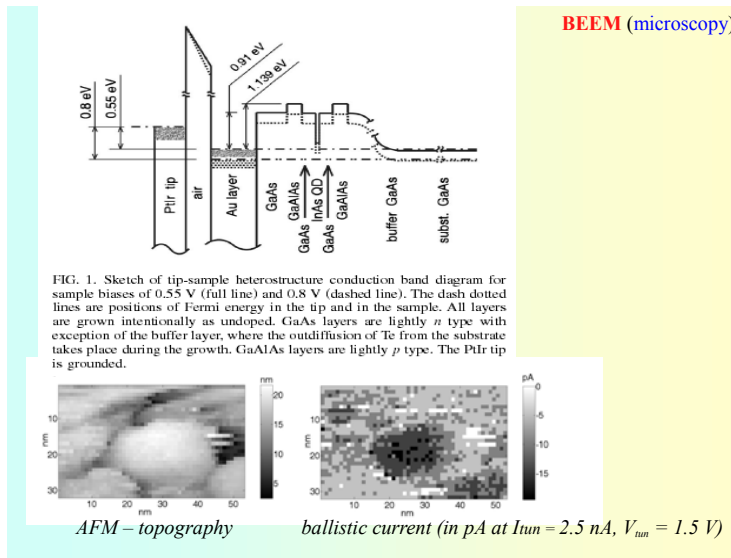
Balistická elektronová emisní mikroskopie a spektroskopie (**BEEM/BEES**) InAs/GaAs QD v AlGaAs/GaAs heterostruktuře je technicky velmi náročná metoda, ale podává přímý obraz kvantových hladin v QD. Na obr. 17 je schéma aparatury na měření balistické elektronové emisní spektroskopie.



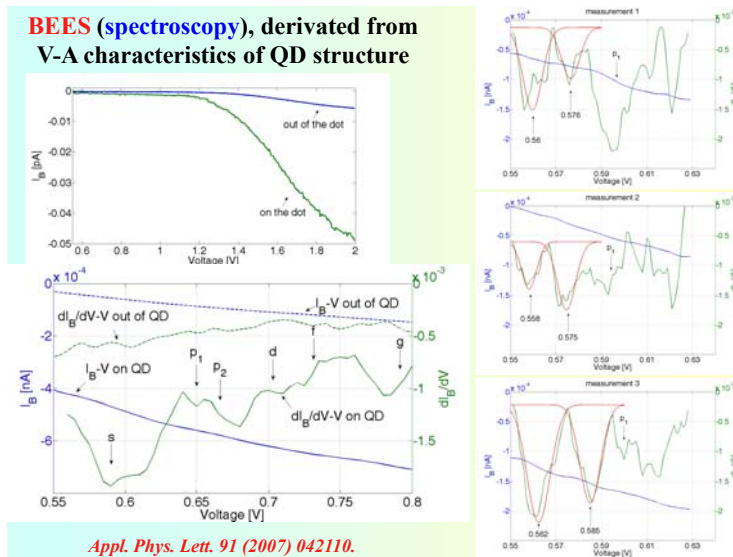
Obr. 17. Schéma měření balistické elektronové emisní spektroskopie.

Na obr. 18 je znázorněna elektronová část pásové struktury QD struktury měřené BEEM. Na obrázku dole vlevo je AFM topologie jedné celé QD a několika částí dalších, vpravo je mapa balistických proudů z téhož místa. Je nutno měřit pikoampéry.

Výsledky měření BEES jsou na obr. 19. Zleva: Volt-Ampérové charakteristiky měřené na a mimo QD, hrubé a jemnější měřítko, ve spodním obrázku je též derivace těchto křivek. Vpravo je srovnání těchto křivek s vypočtenými [15] kvantovými hladinami s_1 a s_2 pro různá místa na QD. Shoda je překvapivě dobrá. U vyšších hladin tomu tak už všude není.



Obr. 18. Nahoře je schéma struktury pro měření BEEM, dole vlevo AFM topologie QD, vpravo mapa balistických proudů z téhož místa.

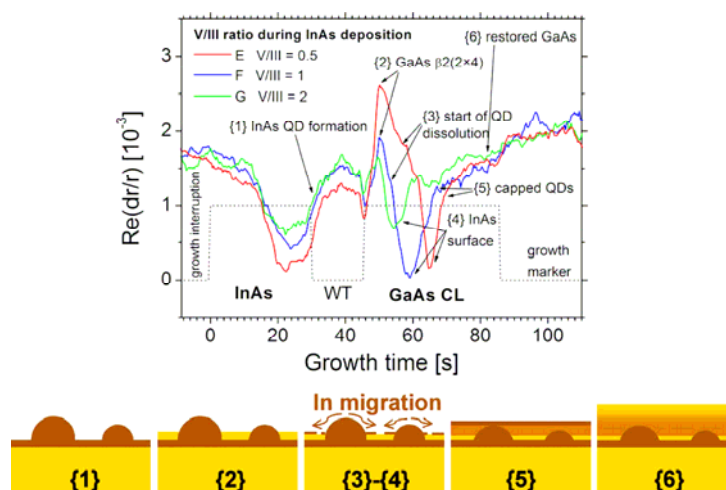


Obr. 19. Výsledky měření BEES – zleva: Volt-Ampérové charakteristiky měřené na a mimo QD, hrubé a jemnější měřítka, dole i derivace těchto křivek. Vpravo srovnání křivek s vypočtenými kvantovými hladinami s_1 a s_2 .

3.4 Povrchové procesy během růstu InAs/GaAs kvantových teček monitorované reflektanční anizotropickou spektroskopií

[XXIII] Surface processes during growth of InAs/GaAs quantum dot structures monitored by reflectance anisotropy spectroscopy
A. Hospodková, J. Vyskočil, J. Pangrác, J. Oswald, E. Hulicius, K. Kuldová, Surface Science **604** (2010) 318-321

Časově rozlišené průběhy reflektanční anizotropické spektroskopie měřené pro fotony s energií 4,2 eV byly použity pro optimalizaci technologických parametrů pro růst kvantových teček. Byly měněny dávky TMI a arsínu, čekací doba pro vznik QDs a parametry krycí vrstvy. RAS nám umožňuje studovat povrchové procesy při MOVPE růstu. Poprvé byl přímo pozorován proces migrace In atomů z InAs/GaAs ODs během růstu krycí vrstvy, viz obr. 20. Fotoluminiscenční měření byla použita pro hodnocení výsledných struktur s QDs.



Obr. 20. Nahoře jsou časově rozlišené průběhy RAS pro různé růsty s odlišnými technologickými parametry, dole model růstu vytvořený na jejich základě.

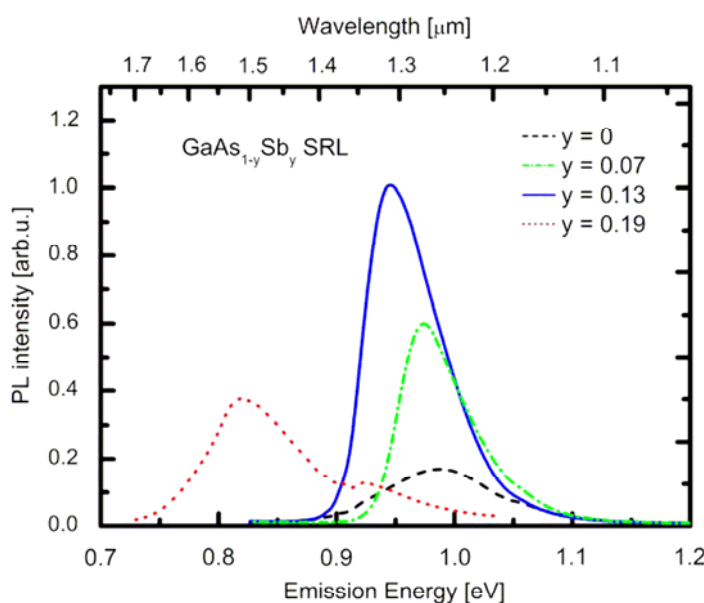
3.5 Vliv ternárních InGaAs a GaAsSb vrstev redukcujících napětí a pokrývajících kvantové tečky

[XXVI] Self-Assembled InAs/GaAs Quantum Dots Covered by Different Strain Reducing Layers Exhibiting Strong Photo- and Electroluminescence in 1.3 and 1.55 μm Bands

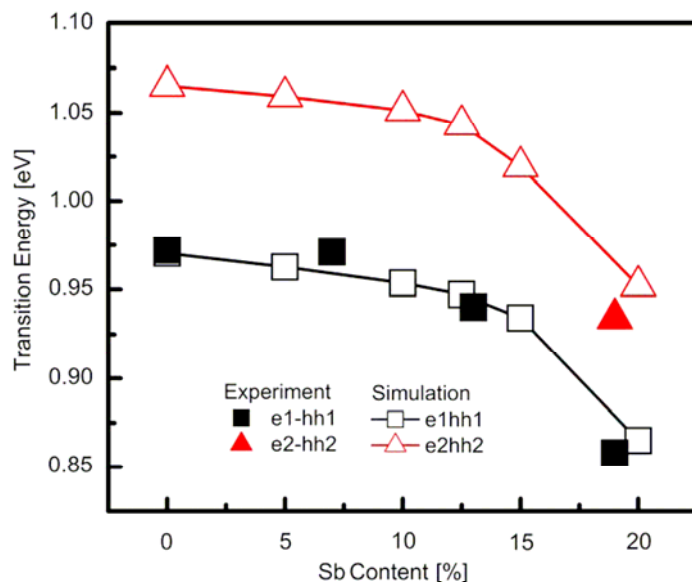
Byl studován vliv ternárních InGaAs a GaAsSb vrstev redukujících napětí (SRL) na luminiscenci kvantových teček. Cílem bylo posunout emisi z QD na „rekordní telekomunikační“ vlnové délky 1,3 a 1,55 μm . To se podařilo.

[XXIV] Influence of strain reducing layers on electroluminescence and photoluminescence of InAs/GaAs QD structures,
A. Hospodková, J. Pangrác, J. Oswald, P. Hazdra, K. Kuldová, J. Vyskočil,
and E. Hulicius, Journal of Crystal Growth **315** (2011) 110-3

Větší posun k delším vlnovým délkám byl dosažen pomocí InGaAs SRL než pro GaAsSb SRL ve stejných strukturách s QD. To může být způsobeno zvětšením velikosti QD během růstu InGaAs SRL. Heteropřechod mezi InAs QDs a GaAsSb SRL se mění z prvního na druhý typ při růstu koncentrace Sb nad 14%. Největší intenzita PL byla dosažena pro 13% Sb v SRL, viz obr. 21. Výsledky PL a EL byly srovnány s modelovými vypočtenými hodnotami, obr. 22.



Obr. 21. Fotoluminiscence QD s GaAsSb SRL pro různá její složení.



Obr. 22. Srovnání změřené PL (plné symboly) s hodnotami vypočtenými pro energie přechodů pro e_1-hh_1 (čtverce) a e_2-hh_2 (trojúhelníky) v QDs pokrytých GaAsSb SRL s různým obsahem Sb při pokojové teplotě. Simulace je pro QD se stejnou výškou.

4. Literatura

4.1 Literatura citovaná v této práci

- [1] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanotechnologie>
- [2] <http://petrik.bigblogger.lidovky.cz/c/107693/Tajemstvi-barvy-zlata-a-antickych-poharu.html>
- [3] Klaus von Klitzing, lecture on nano- patenting, Hague, 2003
- [4] Gribbin, John; Gribbin, Mary (1997). Richard Feynman: A Life in Science. Dutton. p. 170. ISBN 0452276314
- [5] Taniguchi, Norio (1974). "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'". Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, 1974, Part II (Japan Soc. of Precision Engineering)
- [6] K. Sommer, L. Baldi, E. Hulicius, C. Moitier, F. Mudry, T. Wilkins Economic Impact of NMP NMP Expert Advisory Group (EAG) Position Paper on Future RTD Activities of NMP for the Period 2010 - 2015, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2010, pp. 5 – 30, ISBN 978-92-79-14065-5

[7] *President Clinton's speech: My budget supports a major new National Nanotechnology Initiative, worth \$500 million. Over 40 years ago, Caltech's own Richard Feynman asked, "What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them?". President George W. Bush further increased funding for nanotechnology. In 2003 Bush signed into law the 21st Century Nanotechnology Research and Development Act, which authorizes expenditures for five of the participating agencies totaling US\$3.63 billion over four years. The NNI budget supplement for Fiscal Year 2009 provides \$1.5 billion dollars to the NNI.*

[8] Jones, Richard M. (21 January 2000). "President Requests Significant Increase in FY 2001 Research Budget". FYI: The AIP Bulletin of Science Policy News. American Institute of Physics.

<http://www.aip.org/fyi/2000/fyi00.008.htm>. Retrieved 13 May 2011

[9] "National Nanotechnology Initiative: FY 2009 Budget & Highlights". United States National Nanotechnology Initiative. Archived from the original on 27 May 2010.

http://replay.web.archive.org/20100527150059/http://www.nano.gov/NNI_FY09_budget_summary.pdf

[10] R. Kubínek, M. Vůjtek, M. Mašláň, *Mikroskopie skenující sondou*, Univerzita Palackého Olomouc 2008, ISBN 8024406020

[11] T. Prnka, J. Šhrbená, K. Šperlink; M. Černík, E. Hulicius, J. Kubátová, A. Prokop, M. Solar, *Nanotechnologie v České republice 2008. Česká společnost pro nové materiály a technologie*, 2008. ISBN 978-80-7329-187-7. (anglická mutace Nanotechnology in Czech Republic 2008)

[12] V. A. Schuskin, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, *Epitaxy of Nanostructures*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2004, ISBN 3-540-67817-4

[13] M. A. Herman, W. Richter, H. Sitter, *Epitaxy*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2004, ISBN 3-540-67821-9

[14] J. Vyskočil, *Disertační práce, FEL-ČVUT 2009*

[15] O. Stier, M. Grundmann, D. Bimberg, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 5688

4.2 Přehled vlastních publikovaných QD prací: 1998 – 2011

[I] J.Oswald, E.Hulicius, V.Vorlíček, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, G.Lippold, and V.Riede, *Study of InAs Quantum Dots in GaAs prepared on misoriented substrates*, *Thin. Sol. Films* **336** (1998) 80-83

[II] A.Hospodková, E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, K.Melichar, and T.Šimeček, *Strained InGaAs/GaAs Multiple Quant. Wells Grown by MOVPE*, *Czech. J. Phys.* **49** (1999) 805-811 **2000**

[III] J.Oswald, K.Kuldová, J.Zeman, E.Hulicius, S.Jullian, M.Potemski, *Magneto-photoluminescence study of energy levels of self-organised InAs/GaAs quantum dots*, *Mat. Sci. and Eng.* **B69-70** (2000) 318-323

[IV] J.Pangrác, J.Oswald, E.Hulicius, K.Melichar, V.Vorlíček, I.Drbohlav, T.Šimeček, *InAs/GaAs Multiple quantum dot structures grown by LP-MOVPE*, *Thin. Sol. Films* **380** (2000) p. 101-104

2002

[V] J.Oswald, E. Hulicius, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, O.Petříček, K.Kuldová, P.Hazdra, J.Voves, Lasers with δ -InAs Active Layer in GaAs, *Mat. Sci. and Eng.* **B88** (2002) 312-316

[VI] K.Kuldová, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, and J.Zeman, Magneto-photoluminescence study of electronic transitions of self-organised InAs/GaAs quantum dots: mono- and multilayer structures, *Mat. Sci. and Eng.* **B88** (2002) 247-251

[VII] J.Toušková, E.Samochin, D.Kindl, J.Toušek, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, K.Melichar, and T.Šimeček, Photovoltage Spectroscopy of InAs/GaAs Quantum Dot Structures, *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 10103-6

[VIII] J.Humlíček, D.Munzar, K.Navrátil, M.Lorenc, J.Oswald, J.Pangrác, E.Hulicius, Polarization anisotropy of photoluminescence from multilayer InAs/GaAs quantum dots, *Physica E* **13** (2002) 229-232

2006

[IX] V.Křápek, K.Kuldová, J.Oswald, A.Hospodková, E.Hulicius, J.Humlíček, Elongation of InAs/GaAs quantum dots from magnetophotolum. measurements, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006), 153108

[X] K.Kuldová, V.Křápek, A.Hospodková, O.Bonaventurova-Zrzavecka, J.Oswald, E.Hulicius, and J.Humlíček, Photoluminescence and magnetophotoluminescence of circular and elliptical InAs/GaAs quantum dots, *Mater. Sci. Eng. C* **26**, (2006) 983-986

2007

[XI] A.Hospodková, V.Křápek, K.Kuldová, J.Humlíček, E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, and J.Zeman, Photoluminescence and magnetophotolum. of vertically stacked InAs/GaAs quantum dot structures, *Physica E* **36** (2007) 106-113

[XII] A.Hospodková, E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, T.Mates, K.Kuldová, K.Melichar, and T.Šimeček, Properties of MOVPE InAs/GaAs quantum dots overgrown by InGaAs, *J. Cryst. Growth*, **298** (2007), 582-585

[XIII] A.Hospodková, V.Křápek, T.Mates, K.Kuldová, J.Pangrác, E.Hulicius, J.Oswald, K.Melichar, J.Humlíček, and T.Šimeček, Lateral shape of InAs/GaAs quantum dots in vertically correlated structures, *J. Cryst. Growth*, **298** (2007) 570-573

[XIV] J.Walachová, J.Zelinka, V.Malina, and J.Vaniš, F.Šroubek, J.Pangrác, K.Melichar, and E.Hulicius, Study of InAs quantum dots in AlGaAs/GaAs heterostructure by ballistic electron emission microscopy/spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 042110

2008

[XV] J.Walachová, J.Zelinka, V.Malina, and J.Vaniš, F.Šroubek, J.Pangrác, K.Melichar, and E.Hulicius, Ballistic electron emission spectroscopy/microscopy of self-assembled InAs quantum dots of different sizes embedded in GaAs/AlGaAs heterostructure, *Appl. Phys. Lett.* **92** 1 (2008) 012101-1

[XVI] P.Hazdra, J.Voves, J.Oswald, K.Kuldová, A.Hospodková, E.Hulicius, and J.Pangrác, Optical characterisation of MOVPE grown vertically correlated InAs/GaAs quantum dots, *Microelectronics Journal* **39** (2008) 1070-1074

[XVII] E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, J.Vyskocil, A.Hospodková, K.Kuldová, K.Melichar, and T.Šimeček, Growth and properties of InAs/In_xGa_{1-x}As/GaAs quantum dot structures, *J. Cryst. Growth*, **310** (2008) 2229-2233

[XVIII] P.Hazdra, J.Oswald, M.Atef, K.Kuldová, A.Hospodková, E.Hulicius, and J.Pangrác, InAs/GaAs quantum dot structures covered by InGaAs strain reducing layer characterized by photomodulated reflectance, *Mat. Sci. Eng. B* **147** (2008) 175-178

[XIX] A.Hospodková, J.Pangrác, J.Oswald, E.Hulicius, K.Kuldová, J.Vyskočil, K.Melichar, and T.Šimeček, Influence of capping layer on the properties of MOVPE grown InAs/GaAs quantum dots, *J. Cryst. Growth*, **310** (2008) 5081-5084

2009

[XX] P.Hazdra, J.Oswald, V.Komarnitsky, K.Kuldova, A.Hospodkova, E.Hulicius, and J.Pangrac, Influence of capping layer thickness on el. states in self assembled MOVPE grown InAs quantum dots in GaAs, SUPERLAT. AND MICROSTRUCTURES **46** (2009) 324-327
[XXI] J.Vaniš, J.Zelinka, V.Malina, M.Henini, J.Pangrác, K.Melichar, E.Hulicius, and F.Šroubek, J.Walachová, Preliminary comparison of ballistic electron emission spectroscopy measurement on InAs quantum dots in a GaAs/AlGaAs heterostructure grown by MBE and MOVPE Microelectronics Journal **40** (2009) 496– 498

2010

[XXII] A.Hospodková, E.Hulicius, J.Pangrác, J.Oswald, J.Vyskočil, K.Kuldová, T.Šimeček, P.Hazdra, and O.Caha, InGaAs and GaAsSb strain reducing layers covering InAs/GaAs quantum dots, J. Cryst. Growth. **312** (2010) 1383-1387

[XIII] A.Hospodkova, J.Vyskočil, J.Pangrac, J.Oswald, E.Hulicius, and K.Kuldova, Surface processes during growth of InAs/GaAs quantum dot structures monitored by reflectance anisotropy spectroscopy Surface Science **604** (2010) 318-321

2011

[XIV] A.Hospodkova, J.Pangrac, J.Oswald, P.Hazdra, K.Kuldova, J.Vyskočil, and E.Hulicius, Influence of strain reducing layers on electroluminescence and photoluminescence of InAs/GaAs QD structures, J. of Crystal Growth **315** (2011) 110-113

[XV] A.Hospodková, J.Pangrác, J.Vyskočil, J.Oswald, A.Vetushka, O.Caha, P.Hazdra, K.Kuldová, and E.Hulicius, InAs/GaAs quantum dot capping in kinetically limited MOVPE growth regime, J. of Crystal Growth **317** (2011) 39-42

[XXVI] P.Hazdra, J.Oswald, V.Komarnitsky, K.Kuldová, A.Hospodková, E.Hulicius, and J.Pangrác, Self-Assembled InAs/GaAs Quantum Dots Covered by Different Strain Reducing Layers Exhibiting Strong Photo- and Electroluminescence in 1.3 and 1.55 μm Bands, J. Nanosci. Nanotechnol. **11** (2011) 1-6

B2 Non-impacted Journals

[XXVII] P.Hazdra, J.Voves, E.Hulicius, and J.Pangrác, Optical characterization of MOVPE grown δ -InAs layers, in GaAs, phys. stat. sol. (c) **2** (2005) 1319-1324

[XXVIII] K.Kuldová, V.Křápek, A.Hospodková, J.Oswald, J.Pangrác, K.Melichar, E.Hulicius, M.Potemski, and J.Humlíček, 1.3 μm emission from InAs/GaAs quantum dots, physica status solidi c **3** (2006) 3811-3814

[XXIX] M.Atef, P.Hazdra, V.Komarnitsky, J.Oswald, K.Kuldová, E.Hulicius, and J.Pangrác, Study of InAs/GaAs QDs grown by LP-MOVPE, Acta Metal. Slovaca, **13** (2007) 99-104

[XXX] V.Křápek, K.Kuldová, J.Oswald, A.Hospodková, E.Hulicius, J.Humlíček, Electron states and magnetophotoluminescence of elongated InAs/GaAs quantum dots, Physics of Semiconductors, Pts A and B Book Series: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, Volume: **893**, Pages: 901-902, Published: 2007, DOI:10.1063/1.2730183

[XXXI] P.Hazdra, J.Oswald, V.Komarnitsky, K.Kuldová, A.Hospodková, J.Vyskočil, E.Hulicius, and J.Pangrác, InAs/GaAs quantum dot structures emitting in the 1.55 μm band, Mater. Sci. and Eng. **6** (2009) 012007, Doi: 10.1088/1757-899X/6/1/012007

[XXXII] J.Oswald, P.Hazdra, K.Kuldová, A.Hospodková, E.Hulicius, J.Pangrác, and J.Vyskočil, Electro- and photoluminescence of InAs/GaAs quantum dot structures, Journal of Physics: Conference Series **245** (2010) 012080, doi:10.1088/1742-6596/245/1/01208

Mnoho výsledků studia kvantových teček publikovaných v časopisech a některé kompilace těchto článků, bylo prezentováno na desítkách konferencí, převážně mezinárodních. Některé výsledky obtížně časopisecky publikovatelné (negativní výsledek, možnost různých interpretací, nedostatečná sada vzorků) byly také prezentovány na řadě konferencí a workshopů. Tyto odkazy zde nejsou prezentovány.

4.3 Seznam grantových projektů spojených s QD

MŠMT Rozvoj studia optoelektroniky - spolu s MFF - OK 102 (*spoluřešitelé prof. Kužel, dr. Šimeček*) 1992.

MŠMT Rozvoj studia optoelektroniky - spolu s VŠCHT - OK 103 (*spoluřešitelé doc. Huttel, dr. Šimeček*) 1992.

GA ČR Moderní organokovová technologie pro přípravu kvantověrozměrných struktur v polovodičích ve vztahu k jejich novým fyzikálním a aplikačním vlastnostem (*spoluřešitelé MFF UK, UIPL VŠCHT, FEL ČVUT, PřF MU*) - 102/93/0462 (1993-1995).

EU Metal organic. vaporisation control (METOVAPCO) - CIPA CT 0161 (1993-95).

GA ČR Struktury pro elektroniku a optoelektroniku připravované metodou organokovové epitaxe (*spoluřešitelé MFF UK, UIPL VŠCHT, FEL ČVUT, PřF MU*) - 102/96/1703 (1996-1998).

GA AV Heterorozhraní polovodičových látek AIIIbV - příprava a charakterizace - A1010807 (1998-2000).

GA ČR Kvantové tečky v polovodičích III-V (*spoluřešitelé prof. J. Humlíček PřF MU*) - 202/99/1613 (1999-2001).

GA ČR Materiály a struktury pro elektronické a optoelektronické součástky připravované metodou MOVPE (*spoluřešitelé MFF UK, UIPL VŠCHT, FEL ČVUT, PřF MU*) - 102/99/0414 (1999-2001).

EU European Nanotechnology Network - Index: 52 - MOVPE prepared materials and structures for electronics and optoelectronic devices (2001- 2009).

GA AV Povrchová migrace a rekonstrukce v kinetice růstu vrstev A^3B^5 a návrh modelu pro výpočet koncentrace bodových poruch v technologii MOVPE (*řešitel D. Nohavica, ÚŘE AVČR, spoluřešitelé T. Šimeček, E. Hulicius*) - A2067901 (1999-2001).

GA ČR Kvantově rozměrné, napnuté polovodičové struktury připravené technologií MOVPE (*garant post-doktorandského grantu – A. Hospodková*) 202/02/D069 (2002-05).

GA ČR Kvantové tečky s dlouhovlnnou emisí (*účast na projektu J. Oswalda*)- 202/03/0413 (2003-2005).

GA AV Mechanismus zářivé rekombinace v subnanometrových InAs/GaAs laserových strukturách (*spoluřešitel FEL ČVUT*) A1010318 (2003-2005).

EU Network of Excellence NoE - Photonic Integrated Components and Circuits (ePIX) - (koordinátor pracoviště přidruženého partnera č. 10), (2004-2009).

GA ČR Emise z kvantových teček BEEM/BEES (*účast na projektu J. Pangráce*)- 202/05/0242 (2005-2007).

GA AV Morfology of Quantum Dots and its impact to the electronic structure, (*účast na projektu A. Hospodkové*) 101630601 (2006-2007).

GA ČR Quantum dot engineering, (*účast na projektu J. Oswalda*) - 202/06/0718 (2006-2008).

GA ČR Kvantové tečky pro detektory a jiné součástky - P102/10/1201 (2010-12).

5. Životopis

Doc. Ing. Eduard Hulicius, CSc.

Narozen v Praze 22. 12. 1948. Absolvoval: Ing., KIPL FJFI-ČVUT, 1973; CSc., Degradace polovodičových laserů; FZÚ ČSAV, 1981; habilitace, Optoelektronické polovodičové heterostrukturní součástky, FEL-ČVUT, 2005. Odborné zaměření: příprava a charakterizace polovodičových laserů, epitaxní technologie, polovodičové heterostruktury a nanostruktury. Od roku 1973 je zaměstnán ve FZÚ AV ČR, v. v. i., nyní je vedoucí laboratoře MOVPE (od roku 1991).

Je autorem či spoluautorem více než 300 vědeckých prací (70 z nich bylo publikováno v impaktovaných časopisech) s více než 365 citacemi, přednesl 26 pozvaných konferenčních příspěvků a je spoluautorem šesti monografií. Věnuje se také popularizaci vědy – uveřejnil několik desítek článků v novinách, časopisech, vystupuje v rozhlasu i televizi.

Pravidelně přednáší na FJFI ČVUT a TUL, občas na MFF UK, VŠCHT, PřF MU, FS VUT, UPCE, FEL ČVUT a FBMI ČVUT, je členem doktorských oborových rad na FEL ČVUT a MFF UK. Byl vedoucím osmi diplomových a osmi disertačních prací a dvou postdoktorandských projektů. Vede studentské vědecké projekty a věnuje se vzdělávání učitelů.

Od roku 1996 byl členem Vědecké rady ÚRE a FZÚ, v letech 2003-07 byl místopředsedou a předsedou VR FZÚ. Od roku 2006 je členem Akademického sněmu AV ČR, Rady FZÚ AV ČR, v. v. i., výboru České fyzikální společnosti a předsedou její Polovodičové sekce, členem IEEE, LEOS a výboru nanosekce ČSNMT. Od roku 2001 je externím expertem EU pro evaluace a hodnocení EU projektů, členem EAG-NMP od roku 2008. Od roku 2009 členem steering committee Evropského vědeckého fondu pro EPSD (nano). Působí jako člen vědeckých i organizačních výborů více než čtyřiceti národních i mezinárodních konferencí (stálý člen výborů: IC MOVPE, EW MOVPE, MIOMD, ENF, NANOCON).

Byl koordinátorem více než třiceti projektů, včetně osmi evropských (např. METOVAPCO, ADMIRAL, GLADIS, NEMIS a jiné), které spadají do tří hlavních oblastí: polovodičové lasery, LED a laserové struktury; porézní Si a MOVPE technologie, A^{III}B^V vrstvy, nanostruktury a součástky. Je také koordinátor European Nanotechnology Network - Index: 52 "MOVPE prepared materials and structures for electronics and optoelectronic devices" (od roku 2001) a přidružený partner EU Network of Excellence - "Photonic Integrated Components and Circuits" (ePIXnet, 2004-09). Koordinoval grantový projekt MDA-USA "radar grant project" (2008-11).

Externí a průmyslová spolupráce s více než padesáti institucemi v ČR, Evropě a USA, hlavně v oblasti polovodičových laserů a LED.