

**České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická**

**Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering**

*Ing. Eduard Hulicius, CSc.*

**Vybrané polovodičové nanotechnologie a nanostruktury**

**Selected semiconductor nanotechnologies and nanostructures**

## **Summary**

This lecture is based on the experience and results obtained during the preparation and characterisation of different epitaxial heterogeneous semiconductor nanostructures in MOVPE laboratory of the Institute of Physics of the Academy of Sciences. The lecture covers interdisciplinary results published in co-operation with many other labs, mainly from Universities. 64 original papers are cited. The lecture is didactically designed starting from the description of epitaxial equipment and technologies, through the preparation of hetero- and nanostructure with lower dimensions, to the explanation of nano-characterisation and measurement techniques as well as description of the most interesting original results. The lecture is concentrated on the description of the epitaxial growth from organometalics compounds, and explanation of properties of InAs/GaAs quantum wells and dots including semiconductor laser characterisation.

## **Souhrn**

Tato přednáška vychází ze zkušeností a výsledků získaných při přípravě a charakterizaci různých epitaxních heterogenních polovodičových nanostruktur v laboratoři MOVPE Fyzikálního ústavu AV ČR. Vychází z interdisciplinárních výsledků publikovaných v posledních letech ve spolupráci s řadou převážně univerzitních pracovišť. Je citováno 64 vlastních publikací. Přednáška je didakticky koncipována od popisu epitaxních aparatur a technologií, přes popis přípravy heterostruktur a nano-objektů se sníženou dimensí, až po výklad nano-charakterizačních a měřících technik včetně ukázek nejzajímavějších vlastních výsledků. Těžiště výkladu je v popisu epitaxního růstu z organokovových sloučenin, ve vysvětlení vlastností InAs/GaAs kvantových jam a teček i v charakterizaci připravených struktur včetně polovodičových laserů.

Klíčová slova: Epitaxní technologie, MOVPE, MBE, nanostruktury,  
polovodičové lasery, kvantové struktury, nanoskopie.

Keywords: Epitaxial technologies, MOVPE, MBE, nanostructures,  
semiconductor lasers, quantum structures, nanoscopy.

## **1. Epitaxní techniky pro přípravu polovodičových nanostruktur**

- 1.1. Vysvětlení významu, principu a zasazení do souvislostí
- 1.2. Typy epitaxních růstů
- 1.3. Epitaxe vhodné pro nanotechnologie - Epitaxe z plynné fáze - VPE
  - 1.3.1. Molekulární epitaxe
  - 1.3.2. **Plynná epitaxe z organokovových sloučenin**
  - 1.3.3. **Co máme a děláme v laboratoři MOVPE ve FZÚ**

## **2. Nanostruktury v optoelektronických součástkách**

- 2.1. Vhodné a užívané prvky, sloučeniny a materiály
- 2.2. Struktury, heterostruktury, nanostruktury a fajnovosti
  - 2.2.1. Homogenní struktury
  - 2.2.2. **Heterogenní struktury (heterostruktury) - "klasické"**
  - 2.2.3. **Kvantově rozměrové struktury, Nanostruktury**
  - 2.2.4. "Speciality"
- 2.3. Příklady součástek, které jsou založeny na neklasických (neintuitivních) kvantových fyzikálních jevech
  - 2.3.1. Tunelová dioda. Rezonanční tunelování
  - 2.3.2. Tranzistory HEMT, jednoelektronové tranzistory
  - 2.3.3. **Polovodičové lasery, (s QW a QD)**
  - 2.3.4. Kvantový etalon ohmu (kvantový Hallův jev)
  - 2.3.5. Další vybrané příklady
    - Řešení problému heteropřechodů II. typu
    - QD InAs v GaAs na Si
    - Fulereny
    - Kaskádové lasery
    - Nanocívky
    - Spinotronika

## **3. Diagnostika epitaxního růstu a nanostruktur**

- 3.1. In situ obecné
  - 3.1.1. **Měření vakua**
  - 3.1.2. **Měření teploty**
  - 3.1.3. **Hmotnostní spektroskopie**
  - 3.1.4. Absorpční spektroskopie
  - 3.1.5. Ramanův rozptyl
  - 3.1.6. Laserem indukovaná fluorescence.
- 3.2. In situ povrchové analýzy
  - 3.2.1. Difrakční techniky
    - 3.2.1.1. LEED - Difrakce nízkoenergetických elektronů
    - 3.2.1.2. RHEED - Difrakce vysokoenergetických elektronů odrazem
    - 3.2.1.3. GIXS (Grazing Incidence X-ray scattering)
  - 3.2.2. Optické metody

### 3.2.2.1. Reflektance

Polarizovaného světla

**Anizotropická spektroskopie**

Elipsometrie

Polarizovaná spektroskopie

Povrchová fotoabsorpce

Reflektometrie

### 3.2.2.2. Rozptyl

Laserového světla

**Ramanův**

### 3.2.3. Sondové rastrovací metody

#### 3.2.3.1. **AFM**

#### 3.2.3.2. **STM**

### 3.3. Ex situ

#### 3.3.1. **Optické metody**

#### 3.3.2. Elektrické (transportní)

#### 3.3.3. RTG difrakce

#### 3.3.4. Mikroskopie

##### 3.3.4.1. Elektronové

**SEM**

**TEM**

##### 3.3.4.2. Nanoskopické

**HRTEM**

**X-STM**

**X-AFM**

*Je zjevné, že předložený obsah je maximalistický a snaží se postihnout zadanou problematiku v úplnosti. Z pochopitelných důvodů se tento text i vlastní přednáška omezí na části nejpodstatnější a širěji se bude zabývat těmi (tučně označenými), které bezprostředně souvisí s vlastní prací autora.*

## Úvod

### ***Co to je nanostruktura (nano-technologie, nano-charakterizace)***

*Obvykle se stanovuje podmínka, aby jeden rozměr ve struktuře (případně "objektu") byl pod 100 nm (přísněji pod 20 nm, benevolentněji kolem 200 nm), je to však podmínka nutná, nikoliv postačující.*

*Nemusí to nutně být atomární úroveň (to už je sub-nano), ale už se jí to někdy blíží. Hranice nano- je vlastně až  $10^9$  atomů.*

*Rozhodně to však není pouze "nano", ve smyslu „malý“.*

*Je třeba, aby nanostruktura (nanoobjekt) přinášela jevy (či umožňovala využití jevů) v makrosvětě obvykle zanedbatelných. Nejčastěji se jedná o kvantově-fyzikální jevy.*

*Samozřejmě, že zmenšování rozměrů struktury může být důležité, někdy je to i rozhodující, musí tam být ale ještě "něco"!*

*Jako technologovi se mi moc líbí definice kolegy teoretika Pavla Středy, že nanotechnologie je, "když i technologové musí vzít na vědomí, že existuje kvantová fyzika".*

*Přímo čítankový příklad kombinace nanotechnologie, nanostruktur a kvantové fyziky jsou moderní polovodičové lasery s kvantovými jámami a tečkami.*

*Popsat v úplnosti nebo se byť jen pokusit o vyčerpávající přehled nanotechnologií či dokonce nanostruktur, je v současné době zcela nemožné. I jen dílčí oblasti pokrývají samostatné monografie [a-h]. Omezíme se zde tedy na popis toho co trochu známe a čím se řadu let ve FZÚ zabýváme.*

*Z námi realizovaných nanostruktur to budou kvantové jámy [1-15] a tečky [16-29], pěkný příklad je i porézni křemík [30-34].*

*Co se týká technologií – získali jsme praktické zkušenosti se stavbou i provozem kapalné [35-37] molekulární [38-40] i organokovové [41-50] epitaxe.*

*Neméně důležité je i studium a charakterizace nanostruktur [51-64]. I tomu je zde věnována samostatná kapitola.*

*Jen velmi stručně se zmíníme o existujících i plánovaných aplikacích polovodičových nanostruktur.*

# 1. Epitaxní techniky pro přípravu polovodičových nanostruktur

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

## 1.1. Vysvětlení významu, principu a zasazení do souvislostí

Epitaxní technologie zásadním způsobem přispěly k dnešnímu rozvoji materiálového a polovodičového průmyslu i výzkumu. Umožňují připravovat heterogenní struktury s možností účinného vymezení oblastí pro elektrony a díry pomocí potenciálových bariér, stejně tak lze vymežit vlnovody pro fotony ať skokem či gradientem indexu lomu. Lze připravovat ultratenké (silné i jen jednu atomární rovinu!) vrstvy různého složení – díky pomalé rychlosti růstu a možnosti řídit složení i dotaci vrstev.

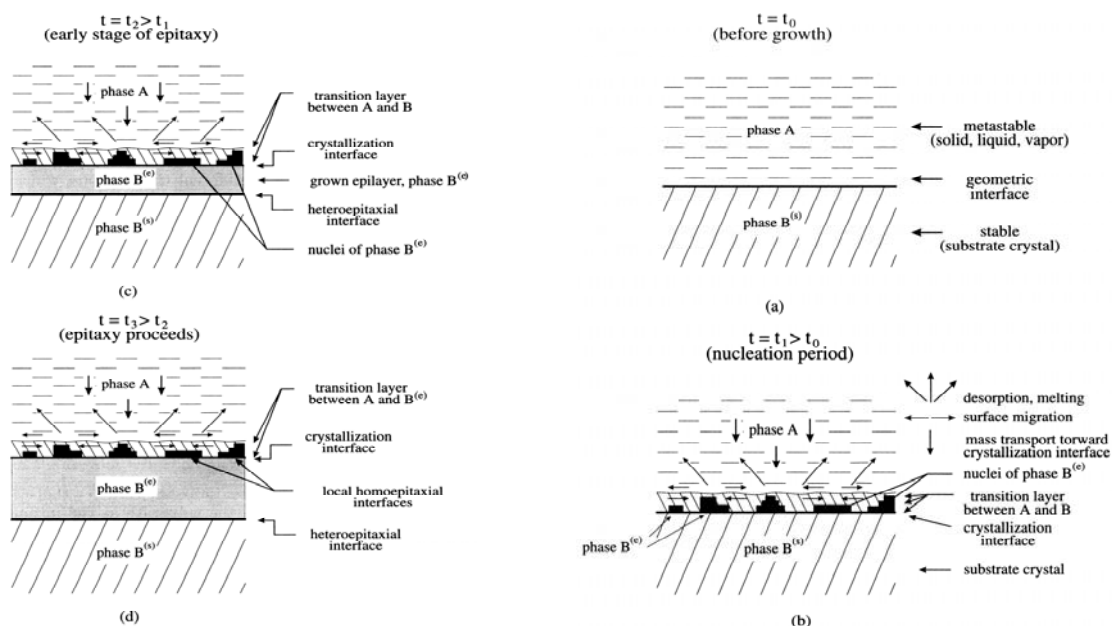
Vše krystalograficky mnohem dokonalejší a čistší než jsou objemové monokrystaly připravované z taveniny, díky nižší teplotě a pomalejšímu růstu.

Tyto možnosti a výhody vysvětlují a ospravedlňují nutnost pracovat s velmi nákladnými aparaturami (desítky milionů korun) a velmi jedovatými a nebezpečnými materiály (arsín, fosfin, berylium, ...).

### Princip epitaxního růstu:

Atomy či molekuly látky, kterou chceme epitaxně deponovat na vhodný substrát, se dopraví k jeho povrchu, ten ovšem musí být atomárně čistý - zbaven oxidů a různých adsorbovaných látek - a atomárně hladký (nebo s atomárními schody danými mírnou rozorientací monokrystalu). Na povrchu dojde nejprve k fyzisorpci, pak na vhodných místech (daných principem minima energie) k chemisorpci jednotlivých atomů, k růstu atomárních vrstev a celé struktury.

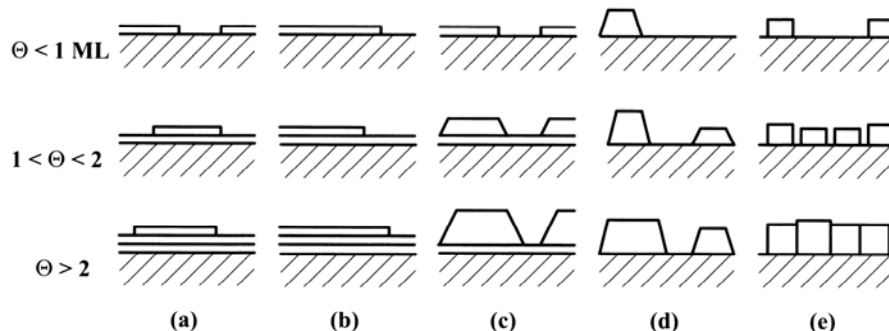
### Jednotlivé fáze epitaxního růstu:





## Druhy růstů

- Vrstva po vrstvě - Frank van der Merweův typ růstu
- Vrstva po vrstvě – spojitěc) Ostrůvky na smáčecí vrstvě - Stranského-Krastanowův
- Ostrůvky na substrátu – Volmerův-Weberův
- Sloupkový typ růstu



## 1.2. Typy epitaxních růstů

Vysvětlení různých používaných zkratk:

Epitaxe z pevné fáze **SPE** (Solid Phase Epitaxy)

Epitaxe z kapalně fáze **LPE** (Liquid Phase Epitaxy)

**LPEE** (Liquid Phase ElectroEpitaxy)

Epitaxe z plynné fáze **VPE** (Vapour (Vapor) Phase Epitaxy)

**CVD** (Chemical Vapour Deposition)

**PVD** (Physical Vapour Deposition)

Molekulární epitaxe **MBE** = Molecular beam epitaxy

**SSMBE** = SolidSource MBE

**CBE** = ChemicalBeamEpitaxy

**GSMBE** = GasSource MBE (HydrideSource, HalideSource)

**MOMBE** = MetalOrganic MBE

**UHV ALE** UltraHighVacuum

AtomicLayerEpitaxy

Plynná epitaxe z organokovových sloučenin

**MOVPE** (MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy)

**MOCVD** (MO Chemical Vapour Deposition)

Photo-**MOVPE** (Netermální, světlem aktivov.)

Plasma-**MOVPE** (Netermální, plasm. aktivov.)

**Epitaxe z pevné fáze** je stará metoda s nově objevenými aplikacemi.

Metastabilní amorfni fáze pevné látky, která je v kontaktu s monokrystalem a krystalizuje postupně od rozhraní, kopírujíc monokrystalickou mřížku.

Rychlost růstu – obvykle desetinny nm za sekundu – je dána aktivační energií SPE  $E_a$  a řídí se rovnicí

$$v = v_0 \exp(-E_a/kT)$$

Použití:

- Příprava silných polovodičových epitaxních vrstev s vysokou úrovní legování.
- Nízkoteplotní epitaxe (Ga(Mn)As vrstvy a struktury. Pro spinotroniku?)
- Růst oddělovacích vrstev (buffer layers) pro zlepšení vlastností heterostruktur, v nichž vznikají vysoké koncentrace dislokací. Současné velmi významné využití pro růst nitridů pro modrou a tím i bílou optoelektroniku.
- Silicidové vrstvy pro elektrické kontakty a Schottkyho bariéry pro Si součástky.

**Epitaxe z kapalně fáze** byla rozhodující epitaxní metoda v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století. Dnes je to stále ještě významná průmyslová metoda (levné LED, sluneční články a všude, kde jsou potřeba epitaxní vrstvy silné desítky  $\mu\text{m}$ ). Je velmi vhodná pro růst složitých sloučeninových systémů v termodynamické rovnováze a pro dotování zeminami vzácných zemin. V laboratořích je to dnes spíše „metoda chudého muže“.

Princip metody:

Nasycený roztok požadovaných látek (např. arzén v galiu) chladne, stává se přesyceným a As se ve formě GaAs vylučuje na vhodné podložce – např. na destičce „objemového“ či epitaxního GaAs.

Tenké vrstvy (i pod 100 nm!) dělat pomocí LPE lze, ale kontakt substrátu s kapalinou musí být velmi krátký, jen milisekundy, ale růst je nereprodukovatelný, nehomogenní atd.

**Kapalná elektroepitaxe** je modifikace kapalně epitaxe, která je řízena proudem, který prochází rozhraním roztok-substrát, vyvolává Peltierův jev a elektromigraci. Používá se pro růst silných (několik mm) a homogenních (lepší než 1%) ternárních vrstev, např. InGaAs na InP či GaAs; AlGaSb na GaSb a pod.

### 1.3. Epitaxe vhodné pro nanotechnologie

*Jsou to pouze epitaxe z plynné fáze – VPE.*

*Dnes a nejméně příštích deset let je a bude VPE zásadní technologie nejen badatelská, ale i průmyslová.*

Je možné ji principiálně rozdělit na fyzikální (**PVD** - Physical Vapour Deposition) a chemickou (**CVD** - Chemical Vapour Deposition), podle způsobu transportu materiálu od zdroje k substrátu.

V prvním případě - PVD - jde o napaření materiálu (pomocí vypařování, napařování, laserovou ablací, výbojem a pod.) bez jeho chemické změny.

V druhém případě - CVD - jde o transport těkavých chemických sloučenin (prekursorů) pomocí nosného plynu k substrátu, kde se (většinou) termicky rozkládají.

Vlastní epitaxní růst na dokonale čistém a hladkém povrchu (většinou) monokrystalického substrátu je pak podobný jako PVD. I parametry vrstev jsou podobné, i když se struktury v některých aspektech mohou lišit. V obou

případech je nutno zajistit extrémní „polovodičovou“ čistotu prostředí, ať je to vakuum (kolem  $10^{-10}$  torru) nebo nosný plyn  $H_2$  či  $N_2$  (na úrovni lepší než ppb). Ohřev substrátu (kvůli jeho dokonalému očištění a atomárnímu vyrovnání - viz výše principy epitaxe) se, vzhledem k těmto extrémním požadavkům na čistotu, provádí nepřímo – vysokofrekvenčním ohřevem, světlem (optickou výbojkou - MOVPE), nebo nepřímým odporovým ohřevem (MBE).

VPE umožňuje i růst jednotlivých atomárních rovin ( Ultra High Vacuum Atomic Layer Epitaxy).

***Pro vlastní PVD růstové procesy má adsorpčně-desorpční kinetika na růstovém povrchu zásadní význam. Poměrně snadno lze růst modelovat a počítat v případě (kvazi-) rovnovážného stavu; obtížnější je to v nerovnovážném stavu, nebo při přechodových jevech.***

Příklad **PVD** je Molekulární epitaxe - **MBE**

Můžeme ji dělit podle toho, z čeho získáváme molekulární svazky:

Solid Source MBE,

Gas Source MBE (Chemical Beam Epitaxy),

Hydride Source MBE, MetalOrganic MBE.

Varianty MBE jsou:

Ultrahigh Vacuum Atomic Layer Epitaxy; migrací urychlená MBE; UV zářením stimulovaná MBE; plasmou aktivovaná MBE; dotování MBE vrstev pomocí iontů.

## **CVD**

Chemický stav daného systému dobře popisuje chemický potenciál  $\mu$ . Pro danou fázi je definován jako vzrůst volné Gibbsovy energie  $\delta G$  když se přidá jeden mol látky při konstantní teplotě a tlaku

$$\mu = \delta G / \delta n /_{T,p}$$

Vyjádříme-li molární Gibbsovu energii  $\Delta G$  pomocí entalpie  $\Delta H$  a entropie  $\Delta S$

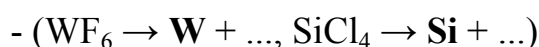
$$\mu = \Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

což lze po dosazení používat k výpočtům.

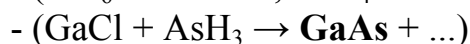
Příklady CVD:

### **Halidová epitaxe**

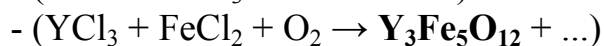
Kovy či elementární polovodiče



Sloučeninové polovodiče

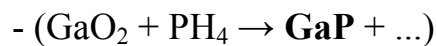


Granáty vzácných zemin



### **Oxidová epitaxe**

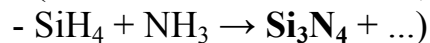
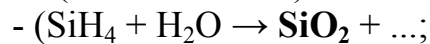
Sloučeninové polovodiče



### Hybridová epitaxe

Elementární polovodiče, veledůležitý křemík -  $(\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + \dots)$

Izolační vrstvy: oxidy, nitridy

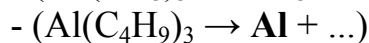


### Organokovová epitaxe

Sloučeninové polovodiče



Kovy



Vysokoteplotní supravodiče



**Zásadní pro optoelektroniku a nanotechnologie jsou MBE a MOVPE**

### 1.3.1. Molekulární epitaxe

Je to zásadní badatelská, ale také i významná průmyslová technologie.

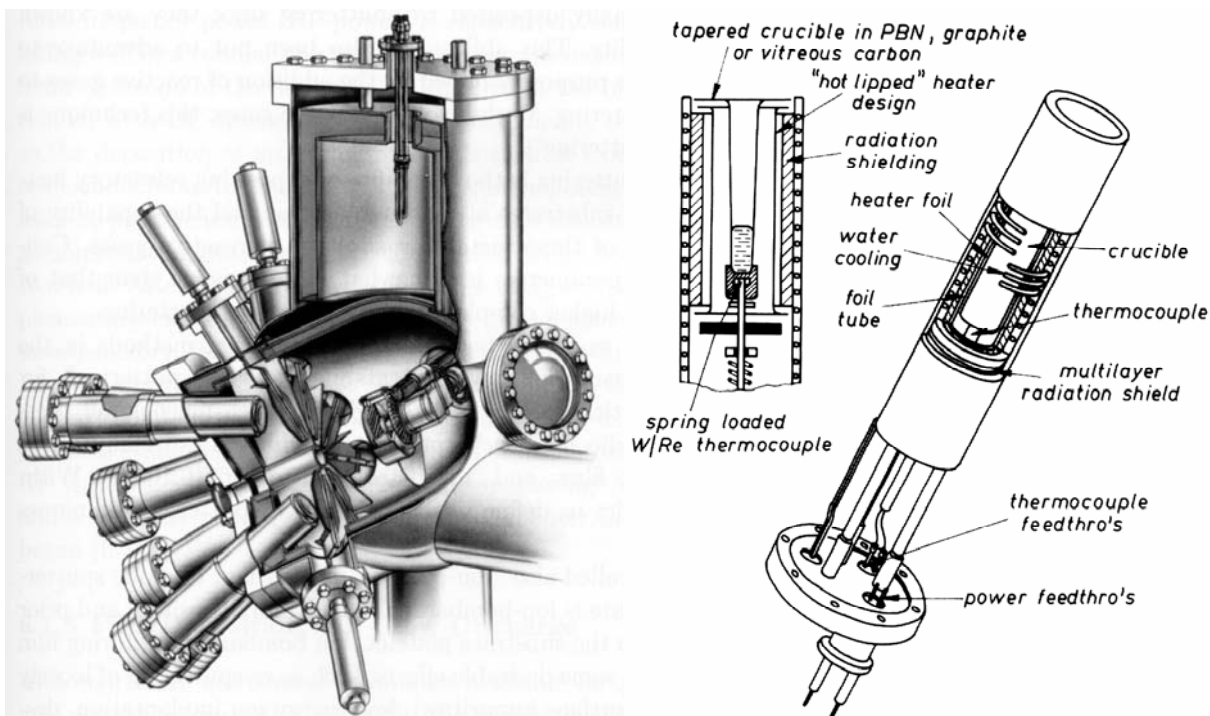
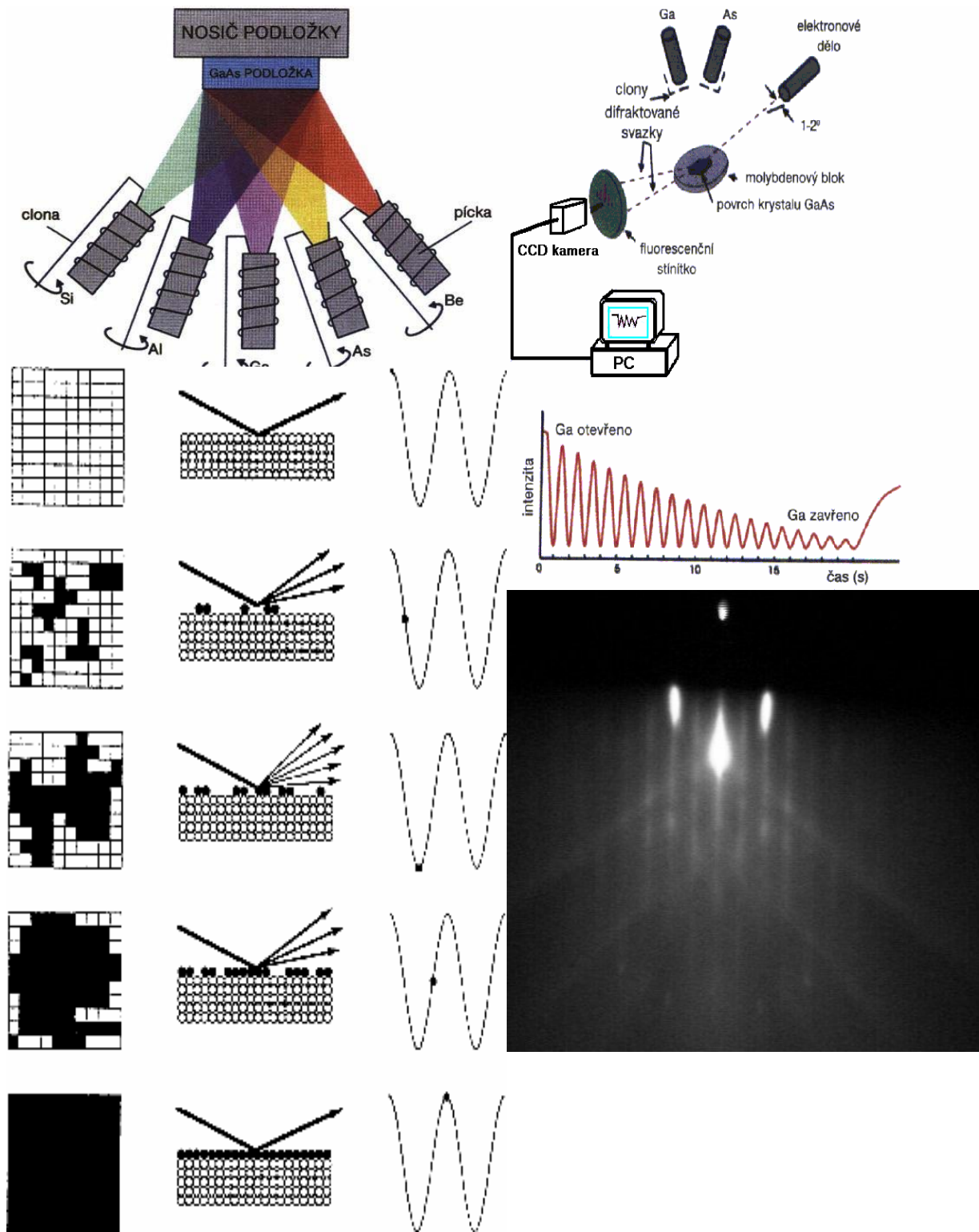


Schéma aparatury a Knudsenovy cely:

#### Princip metody:

Ohřejeme substrát(y) (obvykle je to planetárně rotující monokrystalická polovodičová destička o průměru 2'' až 8'' (palců), která je silná 300 – 500 μm) v prostředí ultravysokého vakua ( $10^{-(9-11)}$  torr) na tak vysokou teplotu, aby desorbovaly přirozené oxidy a povrchové nečistoty a také, aby se povrch atomárně vyhladil. Pak se otevře clonka před otvorem přehřáté efusní Knudsenovy cely a atomy (molekuly) prakticky bez srážek prolétají desítky centimetrů růstovou komorou, dopadají na substrát a napaří se i do jeho okolí.

Atomy budoucí epitaxní vrstvy se usadí na povrchu substrátu (fyzisorpce), migrují po něm a posléze se naváží na správná místa krystalové mřížky (chemisorpce) a vytváří epitaxní vrstvu – to je vlastní princip epitaxe.



Princip MBE růstu a RHEED oscilací, viz *web FZÚ, brána, MBE*

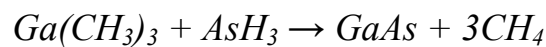
### 1.3.2. Plynná epitaxe z organokovových sloučenin

*Nejvýznamnější průmyslová, ale i široce užívaná badatelská technologie.*

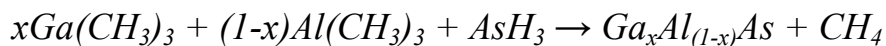
#### Princip metody:

Ohřejeme substrát v prostředí ultračistého plynu (redukční vodík, výjimečně inertní dusík) na tak vysokou teplotu, aby desorbovaly přirozené oxidy a povrchové nečistoty a také, aby se povrch atomárně vyhladil. Pak přivedeme do blízkosti ohřátého substrátu vhodné prekursory (organokovy a hydridy), tyto se zde termicky rozloží a atomy budoucí epitaxní vrstvy se usadí na povrchu (fyzisorpce), migrují po něm a posléze se naváží na správná místa krystalové mřížky (chemisorpce).

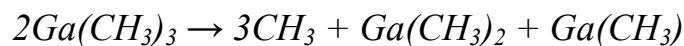
Základní sumární rovnice pro růst GaAs z trimetylgalia (TMGa) a arsínu:



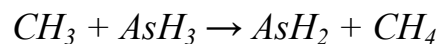
a velmi podobně pro ternární, případně kvaternární sloučeninové polovodiče:



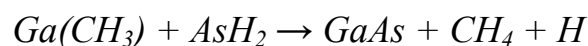
Je to ale složitější, nejprve proběhne pyrolýza TMGa na dimer a monomer:



arsín se rozloží v plynné fázi

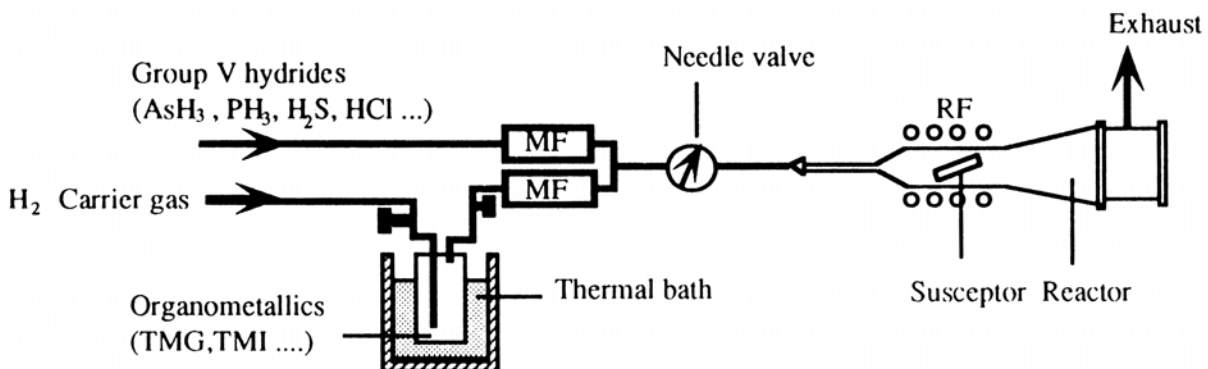


a pak teprve proběhne heterogenní reakce na povrchu horkého substrátu:

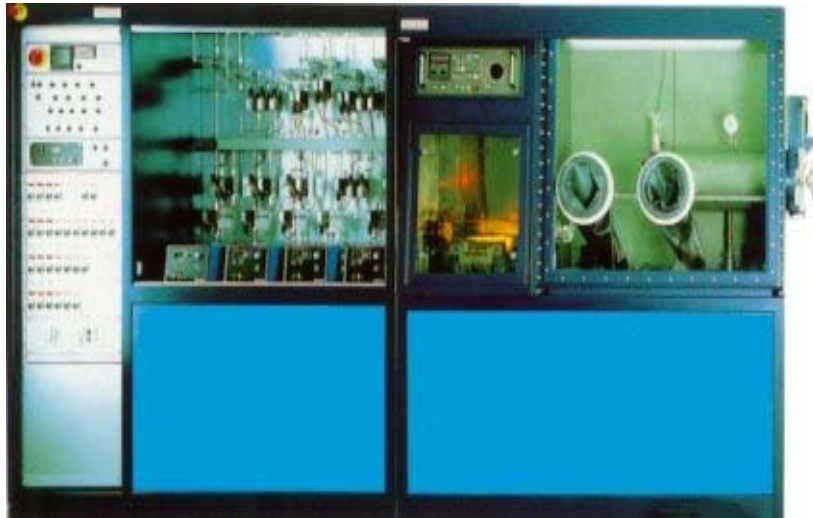


ale doopravdy je to ještě mnohem složitější a jednotlivých kroků je téměř třicet.

Zjednodušené schéma činnosti MOVPE aparatury:



Pohled na aparaturu AIXTRON 200:



### **Stručná historie MOVPE:**

Ruhrwein – US patent (1968)

Manasevit – první pokusy (1968)

Hall, Stringfellow – významný rozvoj metody (1970-1980)

Dupois, Dapkus – dostatečná čistota organokovů (1977/78)

Nejvýznamnější průmyslová epitaxní technologie (1990 - ...)

## 2. Nanostruktury v optoelektronických součástkách

### 2.1. Vhodné a užívané prvky, sloučeniny a materiály

#### Elementární polovodiče

Křemík, germanium, selen, uhlík-diamant,... jsou základní polovodiče, ale často mají nepřímé přechody, také šířku zakázaného pásu  $E_g$  a index lomu  $n$  a další elektrické a optické parametry u nich lze měnit jen velmi málo, zavádějí se tedy:

**Sloučeninové polovodiče**, ze kterých se nanostruktury vytvářejí snáze. Příklady:

$A^{III}B^V$  - GaAs, InP, GaSb,...

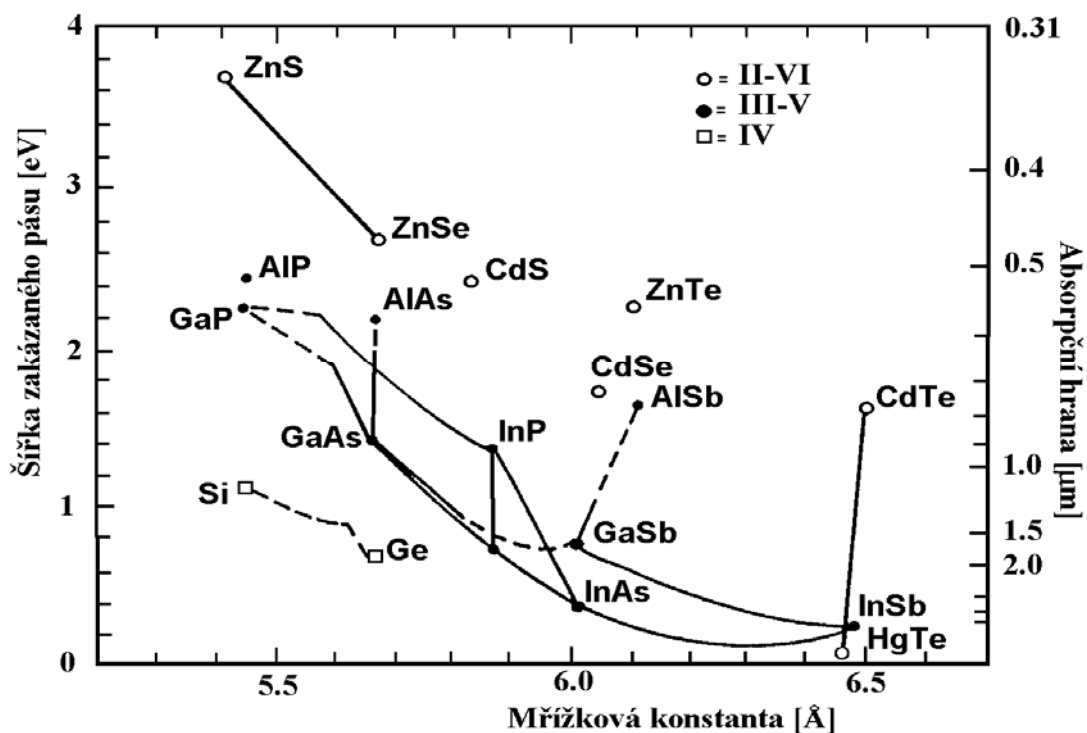
$A^{II}B^{VI}$  - CdTe, CdSe, ...

$A^{IV}B^{IV}$  - GeSi

$A_X^{III}B_{(1-X)}^{III}C^V$  - AlGaAs

$A_X^{III}B_{(1-X)}^{III}C_Y^V D_{(1-Y)}^V$  - GaInAsSb

Závislosti šířky  $E_g$  na mřížkové konstantě binárních, ternárních a kvaternárních polovodičů:



### 2.2. Struktury, heterostruktury, nanostruktury, fajnivosti a materiálové inženýrství

#### 2.2.1. Homogenní struktury

P-N přechody:

Na těch je založena elektronika, zde pár zajímavých příkladů:

Jednoduché, relativně účinné, nepřiliš drahé:



- LED GaAs:Si amfoterní legování;
- polovodičové solární články (hlavně Si);

Semiizolační - legovaná (vodivá) - silně legovaná (velmi vodivá) vrstva.

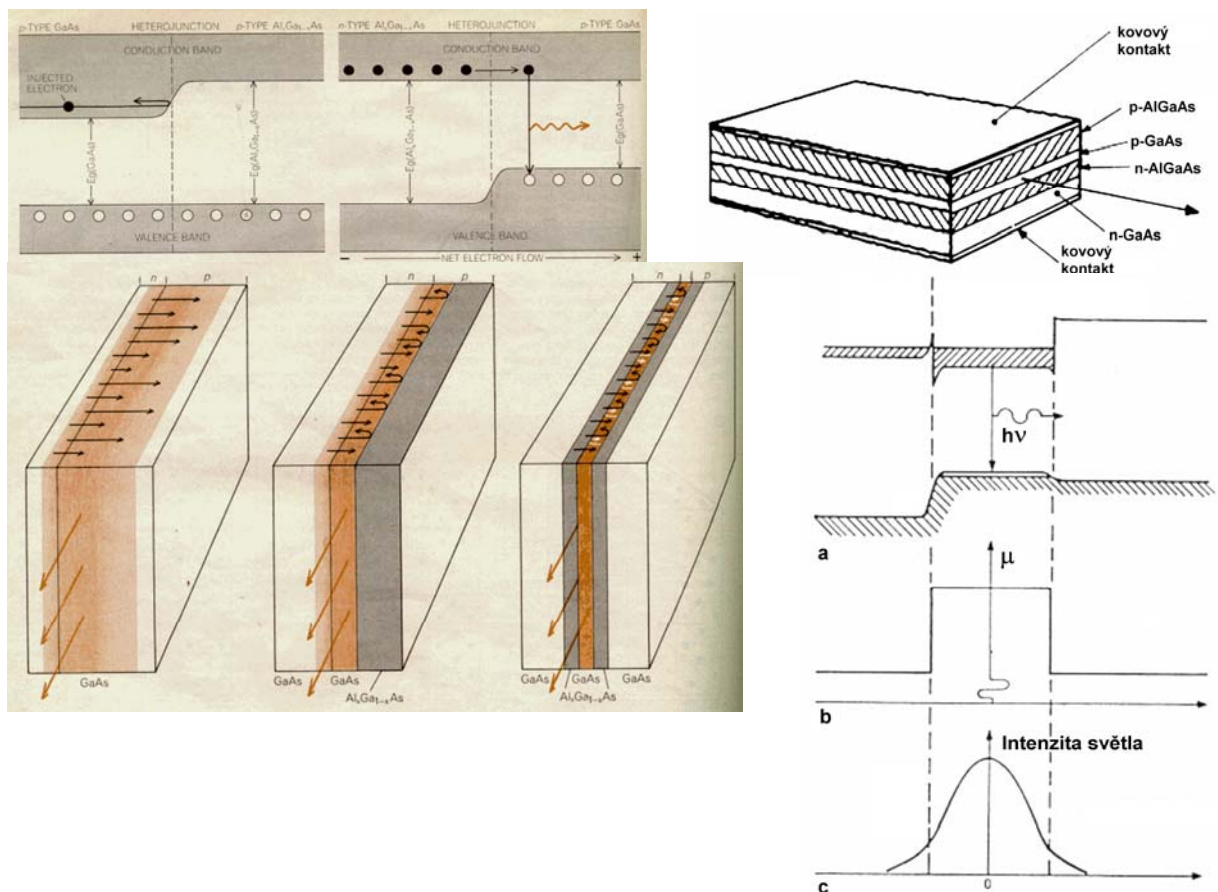
Objemový krystal (bulk) - oddělovací vrstva (epitaxní buffer) – funkční epitaxní vrstva - (postupné zlepšování krystalografické kvality).

Monokrystalická - polykrystalická - amorfni vrstva (nebo obráceně).

### 2.2.2. Heterogenní struktury (heterostruktury) - "klasické"

Zdáleka nejde pouze o heterogenní P-N přechody; lze připravovat skoky, či pozvolné přechody šířky zakázaného pásu, indexu lomu a tak účinně miniaturizovat objemy kde se lokalizují (omezí) elektrony, díry a fotony – ještě však nemusí jít o nanostruktury. Velmi instruktivní je starý obrázek z r. 1971 z časopisu Scientific American:

Vymezení oblastí pro elektrony a díry; skok v indexu lomu vytváří účinný vlnovod:

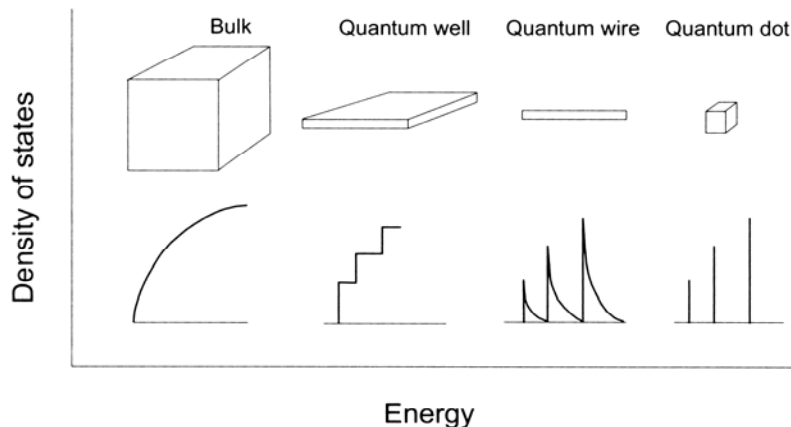


### 2.2.3. Heterostruktury/nanostruktury "kvantově rozměrové"

Zmenšení jednoho, nebo více rozměrů v heterostruktuře na úroveň srovnatelnou s vlnovou – de Broglieho délkou elektronu (od desetin do desítek nanometrů), vytváření nových "umělých" typů struktur jako jsou supermřížky (je rozdíl mezi supermřížkou a mnohonásobnou kvantovou jámou) a kaskádové lasery jsou pěkné příklady systémů, které se již reálně využívají. Zásadní pro pochopení funkce a pro náš další výklad však jsou:

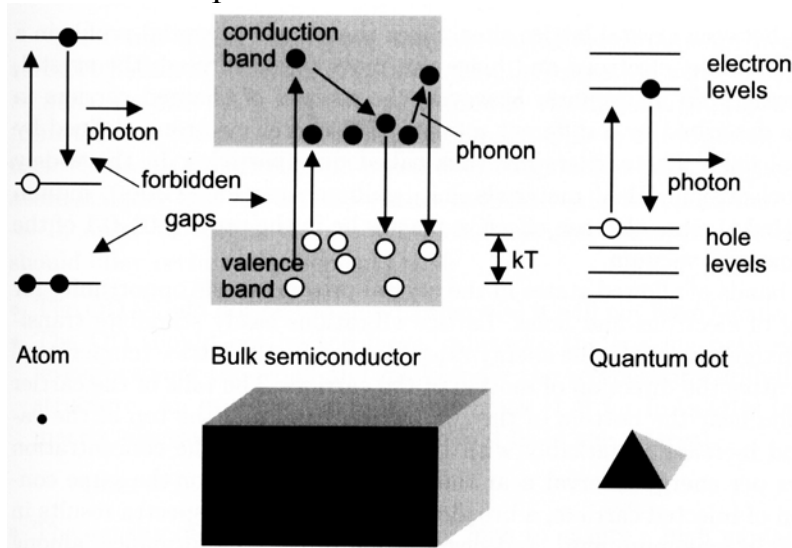
**Kvantové jámy - Kvantové dráty - Kvantové tečky**

Hustoty stavů elektronů pro 3, 2, 1 a 0 dimensionální objekty:



Srovnání povolených energetických hladin (pásů) elektronů a děr pro

**atom - pevnou látku - a kvantovou tečku:**



*Je tedy možné spojováním různých materiálů realizovat potřebné funkční součástky (tranzistory, LEDky a lasery, detektory a sluneční články, ...) s lepšími parametry.*

*Lze i vytvářet nejen nové materiály zadaných vlastností (složitě, v přírodě neexistující, ternární, kvaternární či ještě složitější sloučeniny), ale i nahrazovat je kombinací napnutých binárních systémů s lepšími a kontrolovatelnými vlastnostmi.*

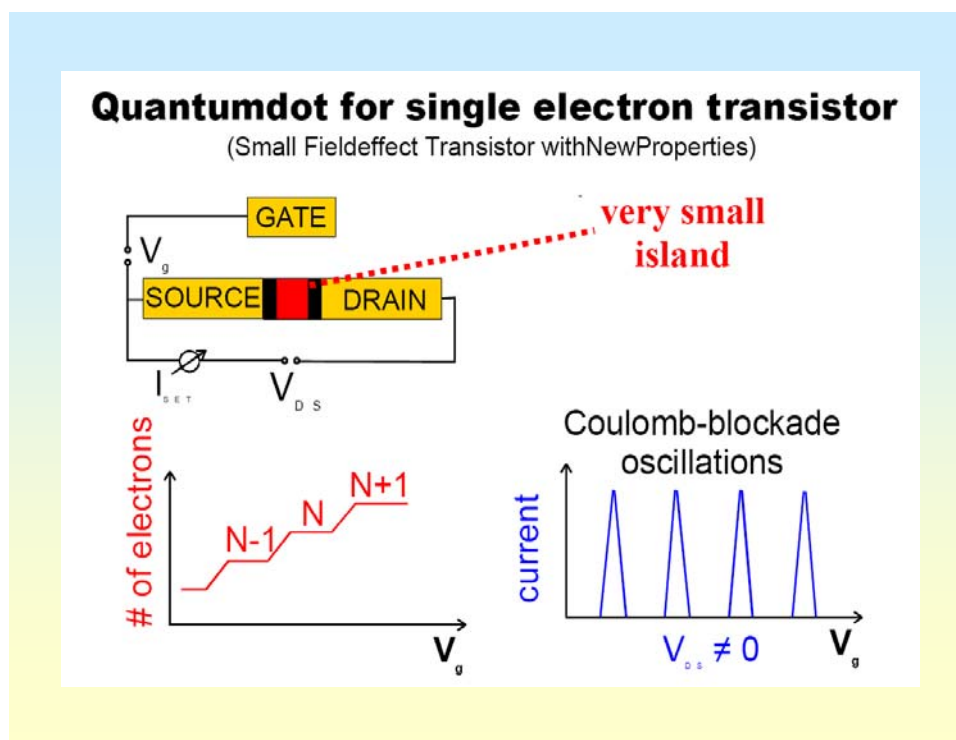
*Lze také konstruovat struktury a součástky (hlavně na bázi nanostruktur) s novými vlastnostmi (supermřížky, CL lasery, molekulární elektronika, nanoroboty (nanobots), QW, QWr(?), QD součástky, některé fotonické krystaly, fotoelektrochemické cely, ...)*

(Pomíjíme zde mezi polovodiče nepatřící biologické aplikace nanočástic, katalýzu pomocí zlatých nano částic, nanomechaniku, většinu fullerenových struktur, nanobarvy, nanotextilie, ...)

### 2.3. Příklady součástek, které jsou založeny na neklasických (neintuitivních) kvantových fyzikálních jevech

Snad nejstarší příklad je **tunelová dioda**. Rezonanční tunelování se dnes využívá v řadě aplikací.

Tranzistory **HEMT** a další, například jednoelektronové tranzistory:



**Polovodičové lasery**, (zvláště s QW a QD) - postupné i skokové zlepšování parametrů se zaváděním nových nízkodimensionálních strukturstruktur.

**Kaskádové lasery** s vnitropásovými přechody.

Kvantový **etalon ohmu** na základě kvantového Hallova jevu. Projekt FEL, FZÚ a MÚ (viz P. Svoboda na webu FZÚ).

### 3. Diagnostika epitaxního růstu a nanostruktur

#### **In situ** (myšleno při růstu)

Při epitaxním růstu bychom rádi znali jaké atomy (molekuly) a v jakém množství se vyskytují v okolí substrátu. Znalost dějů na jeho povrchu je další důležitá informace pro modelování či výpočty růstu.

#### 3.1. In situ - obecně

V růstové komoře měříme **vakuum** (tlak) nebo **čistotu** nosného plynu (i jeho průtok); **teploty** substrátu i vypařovaných látek (lokálně i plošně – *je to netriviální úkol!*). Na měření typu a koncentrace látek přítomných v růstové komoře používáme **hmotnostní spektroskopii**. Pro technologii vakuovou – MBE- je to poměrně snadné a také se může přímo měřit tok molekul z Knudsenovy cely. Pro MOVPE je to trochu složitější - musí se podstatně snížit tlak.

O tom jaké látky se vyskytují v okolí povrchu substrátu můžeme zjistit i pomocí měření **absorpční spektroskopie** (v UV či ve viditelné oblasti).

Mnohem lepší prostorové rozlišení na povrchu substrátu, ale s horší citlivostí nám dává měření **Ramanova rozptylu**.

Jedna z nejcitlivějších detekčních technik je **laserem indukovaná fluorescence**. Je možné detekovat i jen  $10^{-8}$  atomů Si v  $\text{cm}^{-3}$ .

Měření toku (transportu) molekul k povrchu jsou přímá – vložení hmotového spektroskopu přímo do toku molekul, nebo měřením rychlosti částic a částíček pomocí Dopplerova efektu.

#### 3.2. In situ povrchové analýzy

##### 3.2.1. Difrakční techniky

Pro in situ vakuové růstové techniky lze použít difrakci nízkoenergetických (50 – 100 eV) elektronů - **LEED** (Low Energy Electron Diffraction), nebo difrakci vysoko energetických (5 – 50 keV) elektronů odrazem - **RHEED** (Reflection High Energy Electron Diffraction), což je metoda číslo jedna pro MBE – viz obr. u technologie.

Pro nevakuové růstové techniky lze použít „plochý“ RTG rozptyl - **GIXS** (Grazing Incidence X-ray scattering), který se používá se na studium strukturní analýzy povrchu při MOVPE růstu. Je to spíše studijní metoda, je potřeba silný zdroj rentgenového záření (např. synchrotron.).

##### 3.2.2. Optické metody

Umožňují monitorování a řízení růstu i pro nevakuové CVD techniky.

I když fotony jsou mnohem „větší“ než elektrony a tedy nemohou „vidět“ jednotlivé atomy či molekuly na povrchu, povrchové krystalografické útvary a jejich změny při růstu, už „vidět“ jsou a také vypovídají o vlastním procesu růstu.

Optické metody můžeme rozdělit na reflektanci a rozptyl:

### **Reflektance**

Anizotropická spektroskopie, **RAS** (Reflection Anisotropy Spectroscopy) - detekuje povrchovou rekonstrukci.

Elipsometrie, **SE** (Spectr. Ellipsometry) - hůř „vidí“ růst jednotlivých monovrstev, funguje však i pro „isotropní“ povrchy a hlavně dobře „vidí“ růst a rozliší i rychlosti růstu.

Polarizovaná spektroskopie, **PRS** (Polarized Refl. Spectr.) a Povrchová fotoabsorpce, **SPA** (Surface PhotoAbsorption) - jsou v podstatě totéž, světlo dopadá na povrch pod úhlem asi 30° kdy je odrazivost malá a i malé změny povrchu vyvolají velké změny odraženého světla.

**Reflektometrie** - má v podstatě stejné uspořádání jako RAS, je velmi citlivá na měření „optických“ tloušťek (srovnatelných s vlnovou délkou světla) – optimalizace VCSEL laserových struktur. Hlavně se používá pro přesná měření teploty, díky silné závislosti dielektrické funkce.

### **Rozptyl**

**Rozptyl laserového světla** umožňuje měřit povrchové nehomogenity.

**Ramanův rozptyl** (Ramanova spektroskopie) vypovídá nejen o povrchu, ale i o vlastnostech materiálu – složení, vazby, vibrační módy atd. Je to velmi silná badatelská metoda.

Jsou ještě: Generace druhé harmonické **SGH** (Second Harmonic Generation) dvoufotonový nelineární proces a Infračervená reflektanční absorpční spektroskopie **IRRAS** (Infrared Reflection Absorption Spectroscopy), ty však mají v praxi malý význam.

### **3.2.3. Sondové rastrovací metody**

Tyto metody se dají používat i přímo při růstu. Je to však velmi komplikované – vibrace, kontaminace technologické aparatury, hrubé ovlivňování růstu, ... Převládá jejich používání mimo růstovou komoru a také pro příčné techniky (cross, X-...), kdy se vzorek zlomí a pozorujeme příčný profil struktury – to již zcela mimo aparaturu.

### **AFM**

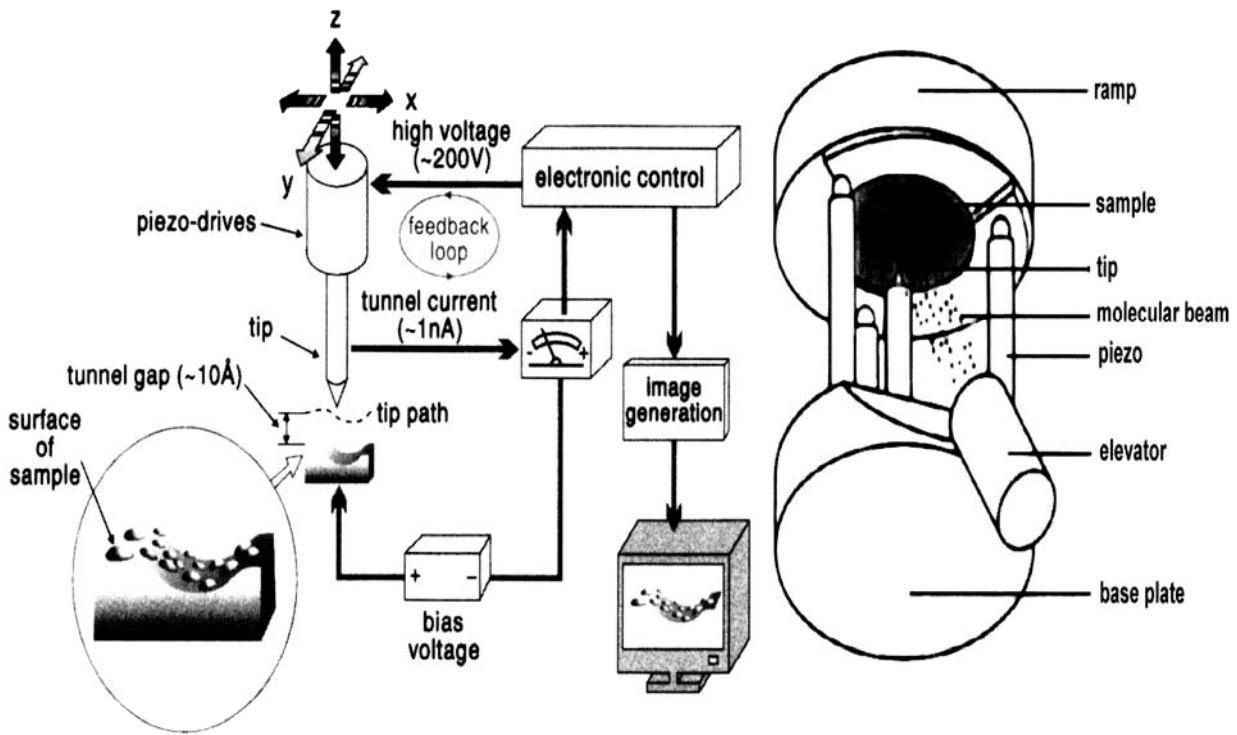
Mikroskopie meziatomárních sil (Atomic Force Microscopy).

Je vhodná i pro nevodivé vzorky. Nepožadujeme-li atomární rozlišení, je to relativně malá aparatura (ceny od 2 do 10 MKč).

### **STM**

Rastrovací tunelová mikroskopie (Scanning Tunneling Microscopy).

Jsou zapotřebí vzorky alespoň trochu vodivé. Dává atomární rozlišení, ceny podle vybavení od 0,5 do 20 MKč).



Princip metody rastrovací tunelové mikroskopie a její možné použití pro MBE in situ. – vpravo.

### 3.3. Ex situ

*(I když řadu měření lze dělat aniž vzorek opustí růstovou komoru nebo ultravakuum.)*

#### 3.3.1. Optické metody

Kromě všech optických uvedených v „In-situ“ to jsou fotoluminiscence a elektroluminiscence a jejich varianty jako magnetofotoluminiscence.

#### 3.3.2. Elektrické (transportní)

Nejrůznější měření odporu, vodivosti, kapacity, dále voltampérové charakteristiky, Hallův efekt.

#### 3.3.3. RTG difrakce

Nyní trochu na ústupu kvůli sondové nanoskopii a TEM, stále ale velmi významná a přesná, často kalibrační metoda (např. pro TEM).

#### 3.3.4. Mikroskopie

Elektronové - SEM a TEM (HRTEM – TEM s vysokým rozlišením).

Sondové - STM (X-STM) a AFM (X-AFM).

Nanoskopické (s atomárním rozlišením) z nich jsou:

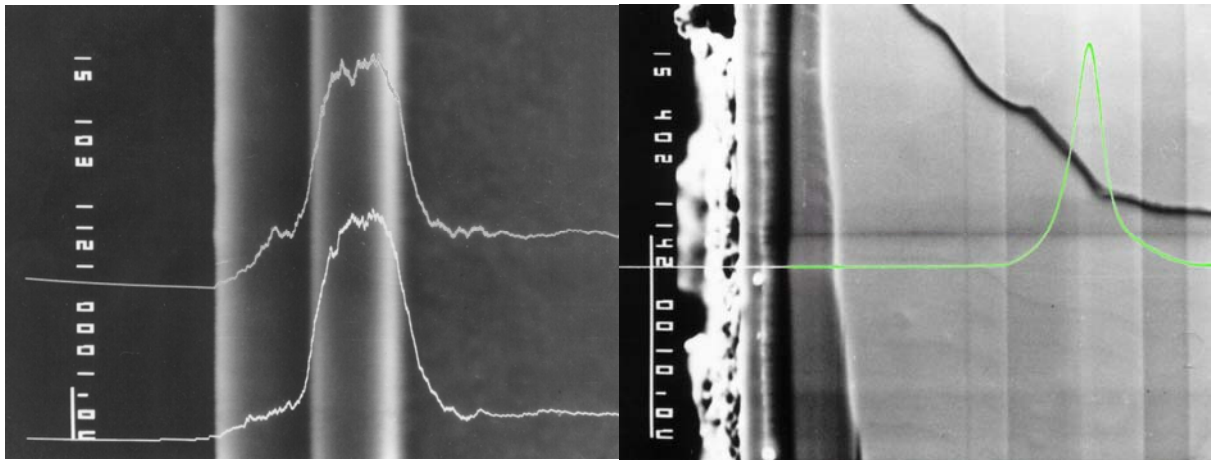
TEM a HRTEM,

STM a X-STM,

AFM a X-AFM.

Řádkovací elektronová mikroskopie **SEM** (Scanning Electron Microscopy) je nesmírně užitečná metoda pro studium polovodičových struktur a heterostruktur.

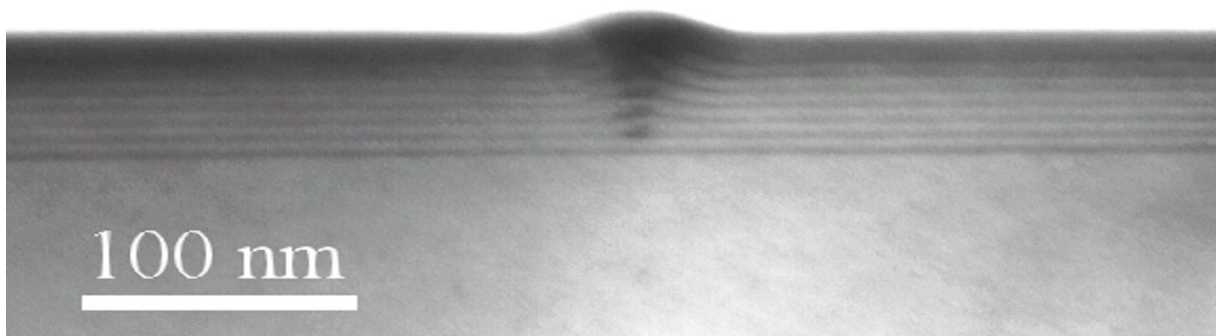
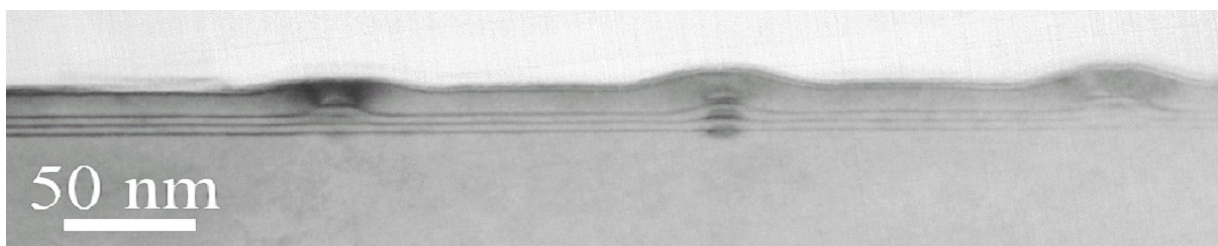
Umožňuje zviditelnit druh materiálu, jeho složení, typ a koncentraci nositelů, polohu a strmost P-N přechodu. Má velkou hloubku ostrosti, obrovský rozsah zvětšení (10 – 100 000). S nanorozměry však má potíže.



Laserové struktury s profily koncentrací Al měřeným rtg. mikrosondou a s P-N přechodem v aktivní oblasti laserové struktury zviditelněným pomocí elektromotorické síly.

Transmisní elektronová mikroskopie **TEM** (Transmission Electron Microscopy) je asi první metoda, která umožnila zviditelnit atomy. Velmi náročná příprava vzorků - ztenčení na 10 - 30 nm. Vidíme průřez strukturou integrálně - což je dobře i špatně – jsou

TEM snímek našich struktur se třemi (nahore) a sedmi rovinami kvantových teček:

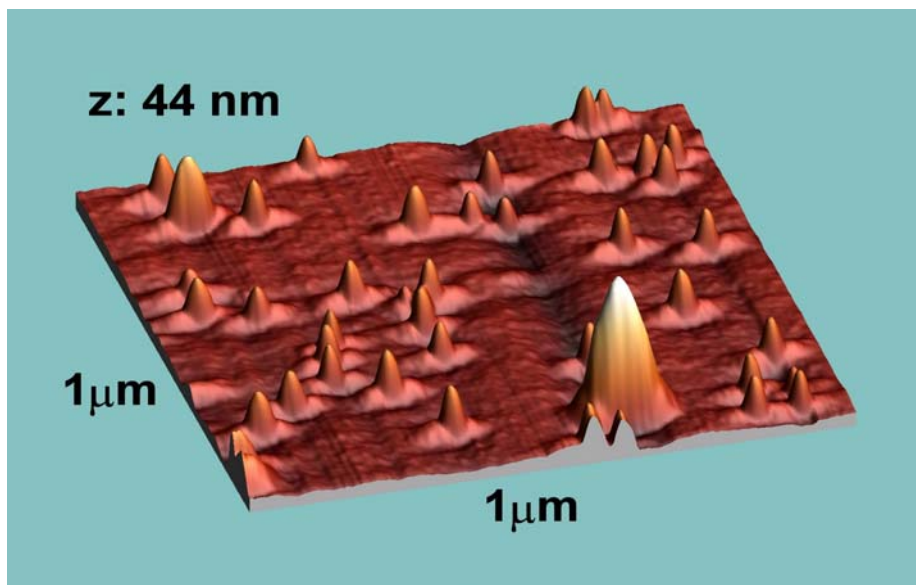




## Mikroskopie meziatomárních sil **AFM** (Atomic Force Microscopy)

Je vhodná i pro nevodivé vzorky. Nepožadujeme-li atomární rozlišení, je to relativně malá aparatura (ceny od 2 do 10 MKč).

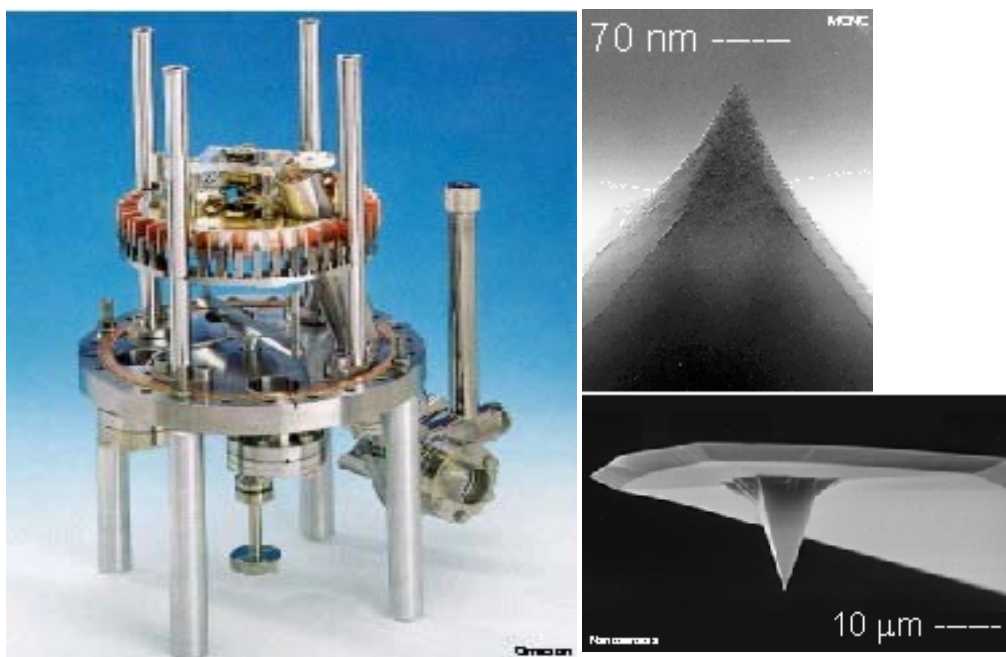
AFM obrázek povrchu mnohonásobné struktury kvantových teček, kde je vidět, jak vypadají poslední nepokryté kvantové tečky, rostoucí na „kopečcích“, kde vznikly kvantové tečky v předchozích rovinách:



## Rastrovací tunelová mikroskopie **STM** (Scanning Tunneling Microscopy).

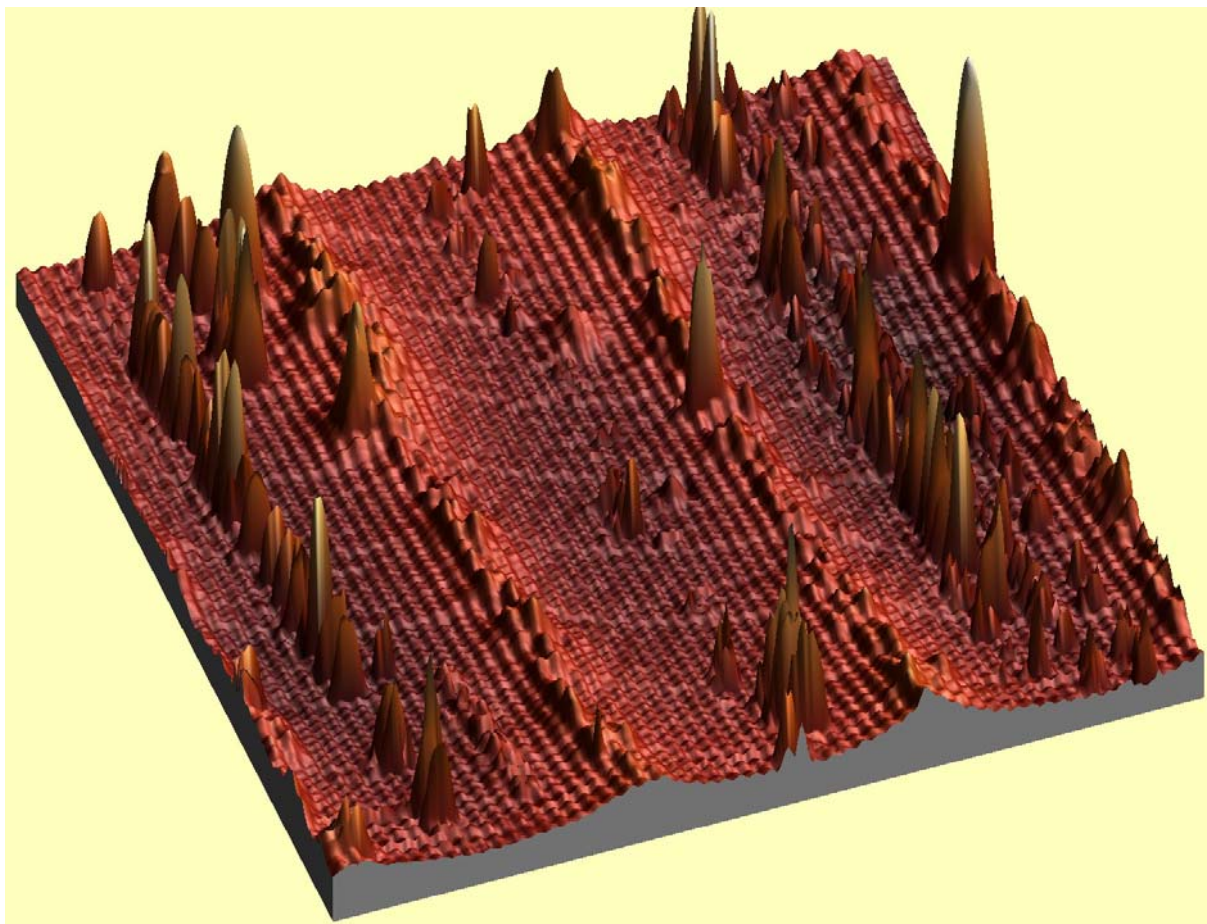
Jsou zapotřebí vzorky alespoň trochu vodivé. Dává atomární rozlišení, ceny podle vybavení od 0,5 do 20 MKč).

Rastrovací hroty (vpravo) a pohled na vnitřek STM aparatury:





**X-STM** obrázek (s atomárním rozlišením) příčného lomu naší struktury s mnohonásobnými kvantovými jamami (vrstvami) InAs v GaAs, z nich jsou vidět dvě uprostřed. Vysoké špičaté útvary jsou artefakty způsobené desorpcí As. Vzdálenost QW lze přesně určit spočítáním atomárních rovin. Je patrná i symetrie/asymetrie QW:



## Literatura

### Vybrané Nano-monografie

- [a] Edward L. Wolf, Nanophysics and Nanotechnology, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2004, ISBN 3-527-40407-4
- [b] Guozhong Gao, Nanostructures and Nanomaterials, Imperial College Press, London 2004, ISBN 1-86094-415-9
- [c] V.A. Schukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Epitaxy of Nanostructures, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2004, ISBN 3-540-67817-4
- [d] Paras N. Prasad, Nanophotonics, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken New Jersey 2004, ISBN 0-471-64988-0
- [e] M.A. Herman, W. Richter, H. Sitter, Epitaxy, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2004, ISBN 3-540-67821-2
- [f] P. Michler, Single Quantum Dots, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2003, ISBN 3-540-14022-0
- [g] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Y. Egorov, N.A. Maleev, Quantum dot lasers, Oxford University Press, 2003, ISBN 0-19-852679-2
- [h] M. Grundmann, Nano-optoelectronics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002, ISBN 3-540-43394-5

### Kvantové jámy

- [1] E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, T.Šimeček, N.S.Bresler, V.N.Cheban, O.B.Gusev, A.N.Titkov, Origin of recombination transitions at the lattice-matched GaInAsSb-GaSb n-N type-II heterojunctions, J. Appl. Phys. **75** (1994) 4189-4193
- [2] J.J.Mareš, J.Křištofik, P.Hubík, E.Hulicius, K.Melichar, J.Pangrác, J.Novák, S.Hasenohrl, Out-of-Plane Weak Localisation in Two-Dimensional Electron Structures, Phys. Rev. Lett. **80**, 18 (1998) 4020-4023
- [3] A.Hospodková, E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, K.Melichar and T.Šimeček, Strained InGaAs/GaAs Multiple Quantum Wells Grown by MOVPE, Czech. J. Phys. **49** (1999) 805-811
- [4] A.Joulie, E.M.Scoury, M.Gaarcia, P.Grech, A.Wilk, P.Christol, and A.N.Baranov; A.Behres, J.Kluth, A.Stein, and K.Heime; M.Heuken; S.Rushworth; T.Šimeček, E.Hulicius, InAs(PSb) based "W" Quant. Well Laser Diodes Emitting Near 3.3.  $\mu\text{m}$ , Appl. Phys.Lett. **76**, N°18 (2000) 2499-2501
- [5] J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, O.Petříček, M.Vančura, J.Hradil, InAs/GaAs Lasers with very thin active layer, Thin. Sol. Films **380** (2000) p.233-236
- [6] A.Wilk(a), F.Genty(a), B.Fraisse(b), G.Boissier(a), P.Grech(a), M.El Gazouli(a), A.Joullié(a), P.Christol(c), J.Oswald(d), T.Simecek(d), E.Hulicius(d), MBE growth of InAs/InAsSb/AlAsSb structures for mid-infrared lasers, J. Cryst. Growth **223** (2001) 341-348
- [7] J.Oswald, E. Hulicius, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, O.Petříček, K.Kuldová, P.Hazdra, J.Voves, Lasers with  $\delta$ -InAs Active Layer in GaAs, Mat. Sci. and Eng. **B88** (2002) 312-316
- [8] P.Hazdra, J.Voves, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, and T.Šimeček,  $\delta$ -InAs structures embedded in GaAs grown by MOVPE characterised by electroluminescence and photocurrent spectroscopy, J. Cryst. Growth **248C** (2003) 328-332
- [9] Pavel Hazdra, Jan Voves, Eduard Hulicius and Jiří Pangrác, Optical characterization of MOVPE grown  $\delta$ -InAs layers, in GaAs, phys. stat. sol. (c) **2** (2005) 1319-1324
- [10] K.D. Moiseev, A.P. Astakhova, G.G. Zebrya, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrác, K. Melichar, and T. Šimeček, Quantum well InAsSbP/InAsSb/AlAsSb laser heterostructures grown by combined MOVPE technology, prepared for Appl Phys Lett. (2005)
- [11] A.Hospodková, E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, Strained InGaAs/GaAs Multiple Quantum Wells Grown by MOVPE, Czech-China Workshop, Inst. of Radioeng., Prague 1998
- [12] J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, O.Petříček, M. Vančura, J. Hradil, InAs/GaAs Lasers with very thin active layer, pres. at Int. Conf. E-MRS Spring meeting, Strasbourg 2000
- [13] P.Hazdra, J.Voves, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, and T.Šimeček,  $\delta$ -InAs structures embedded in GaAs grown by MOVPE characterised by electroluminescence and photocurrent spectroscopy, presented at IC MOVPE XI, Berlin, June 3. -7. 2002, Proc. p. 135
- [14] P.Hazdra, J.Voves, E.Hulicius, J.Pangrác, Optical characterization of MOVPE grown  $\delta$ -InAs layers in GaAs, poster, Proc. of 7th International Workshop on Expert Evaluation and Control of Compound

Semiconductor Materials and Technologies EXMATEC 2004, June 1-4, 2004, Montpellier, France, pp.73-74.

[15] P.Hazdra, J.Voves, E.Hulicius, J.Pangrác and Z.Šourek, Ultrathin InAs and modulated InGaAs layers in GaAs grown by MOVPE studied by photomodulated reflectance spectroscopy, Proc. of MRS meeting, Strasbourg 31.5. -3.6. 2005, p.

#### **Kvantové tečky**

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

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

[18] 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

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

[20] 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

[21] 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) 10103-10106

[22] E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, P. Janda, InAs Quantum Dots in GaAs, NATO Advanced Research Workshop HEAD '97, Smolenice 1997 Proc. of Int. Workshop on Heterostructure Epitaxy and Devices, p. 207

[23] E.Hulicius, J.Oswald, J.Pangrác, K.Melichar, T.Šimeček, Study of InAs Quantum Dots in GaAs Prepared on misoriented substrates, presented at Int. Conf. E-MRS Spring meeting, Strasbourg 1998

[24] E.Hulicius, J.Pangrác, J.Oswald, K.Melichar, V.Vorlíček, I. Drbohlav, T.Šimeček, InAs/GaAs Multiple quantum dot structures grown by LP-MOVPE, pres. at Int. Conf. E-MRS Spring meeting, Strasbourg 2000

[25] J.Humlíček, D.Munzar, K.Navrátíl, M.Lorenc, J.Oswald, J.Pangrác, and E.Hulicius, Polarisation anisotropy of photoluminescence from multilayer InAs/GaAs quantum dots, 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures MSS10, J. Kepler Univ., Linz, July 23-27th, 2001, Proc. TuP64

[26] E.Hulicius, T.Šimeček, J.Pangrác, and J.Oswald, InAs/GaAs Multiple quantum size structures grown by MOVPE; Properties of lasers with  $\delta$ -InAs active multilayer in GaAs; Multilayer self-organised InAs/GaAs quantum dots and rings, Proc of Int. Conf. APCOM 2001, Slovakia, September 2001, ISBN 80-8040-160-8, p. 33-36

[27] A.Hospodková, K.Kuldová, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, T.Šimeček and I.Vávra, MOVPE prepared self-organised InAs/GaAs mono and multilayer quantum dot structures: Magneto-photoluminescence study of electronic transitions, EW MOVPE X, Lecce, June 8-11th 2003, Proc. p. 55-8

[28] A.Hospodková, K.Kuldová, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, I.Vávra, Overlapping of vertically stacked quantum dot electron wavefunctions, 20. GC CMD/EPS, Praha, July 19-23, 2004 Proc. ISBN 2-914771-17-7, p. 28

[29] A. Hospodková, V. Křápek, J. Fikar, K. Kuldová, J. Pangrác, E. Hulicius, J. Oswald, T. Šimeček, Modification InAs/GaAs quantum dot shape in vertically correlated structures, EW MOVPE XI, Lausanne, June 6-8th 2005, Proc.

#### **Porézní křemík**

[30] P.Hlinomaz, O.Klíma, A.Hospodková, E.Hulicius, J.Oswald, E.Šípek and J.Kočka, Photoelectric properties of self-supporting porous silicon, Appl. Phys. Lett. **64** (1994) 3118-3120

[31] J.J.Mareš, J.Křištofik, E.Hulicius, Influence of humidity on transport in p-Si, Thin Solid Films **255** (1995) 272-75

[32] E.Hulicius, J.Oswald, Porézní křemík, Optické vlastnosti pevných látek v základním výzk. a apl., Brno 1994 p. 18-24

[33] J.Oswald, J.J.Mareš, A.Hospodková, E.Hulicius, J.Pangrác, O.Klíma, J.Kočka, The electric field induced changes of photoluminescence of porous silicon, Proc. of the EMRS Spring Meeting, Strasbourg France May 1993, p.E-II/p3

[34] O.Klíma, P.Hlinomaz, A.Hospodková, J.Oswald, E.Hulicius, J.Kočka, Transport properties of selfsupporting porous silicon, Proc. of 15th Internat. Conference on Amorphous Semiconductors, Cambridge 6-10, September 1993, p. Th-p4/9

#### **Kapalná epitaxe**

[35] E.Hulicius, Metody růstu velmi tenkých vrstev pomocí LPE - možnosti a omezení, Fyzika a technologie dvourozměrných systémů, Liblice 1989, Sborník, p. 18

[36] K.D.Moiseev, M.P.Mikhailova, Yu.P.Yakovlev, T.Šimeček, E.Hulicius, J.Oswald, Low temperature photoluminescence of  $\text{Ga}_{0.84}\text{In}_{0.16}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$  solid solutions lattice matched to InAs, J. Appl. Phys. **90** (2001) 2813-2817

[37] S.S.Kizhaev, S.S.Molchanov, N.V.Zotova, E.A.Grebenshchikova, Yu.P.Yakovlev, E.Hulicius, T.Simecek, K.Melichar, and J.Pangrác, Broken-gap heterojunction in the p-GaSb-n-InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> ( $0 \leq x \leq 0.18$ ) system, Technical Physics Letters, Vol. **27**, No. 11, (2001) 964-966. Transl. from Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki, Vol. **27**, No. 22, 2001 (66-72)

#### **Molekulární epitaxe**

[38] A.Joulié, E.M.Scoury, M.Garcia, P.Grech, A.Wilk, P.Christol, and A.N.Baranov; A.Behres, J.Kluth, A.Stein, and K.Heime; M.Heuken; S.Rushworth; T.Šimeček, E.Hulicius, InAs(PSb) based "W" Quantum Well Laser Diodes Emitting Near 3.3.  $\mu\text{m}$ , Appl. Phys.Lett. **76**, N°18 (2000) 2499-2501

[39] A.Wilk, F.Genty, B.Fraisse, G.Boissier, P.Grech, M.El Gazouli, A.Joulié, P.Christol, J.Oswald, T.Simecek, E.Hulicius, MBE growth of InAs/InAsSb/AlAsSb structures for mid-infrared lasers, J. Cryst. Growth **223** (2001) 341-348

[40] P. Christol, A. Behres, J. Kluth M. Garcia, P. Grech, M. Skouri, A. Stein, K. Heime, E.Hulicius, T. Simecek, A. Wilk and A. Joulié, Mid-Infrared electroluminescence in Al-free type-II "W" quantum-well structure, 3rd International Conference Mid-infrared Optoelectronics Materials and Devices (MIOMD III), Aachen, Germany, September 5-7 1999

#### **Organokovová epitaxe**

[41] A.Hospodková, E.Hulicius, J.Pangrác, Epitaxní technol. z organokovových slouč., Ces. cas. fyz. **A48** (1998) 133-138

[42] E.Hulicius, T.Šimeček, A.Hospodková, J.Pangrác, Plynná epitaxe z organokovových sloučenin, 6. Fórum fyziků, Fyzika a chemie, Praha, 17.6., 1998

[43] E.Hulicius, J.Oswald, A.Hospodková, J.Pangrác, K.Melichar, and T.Šimeček, Preparation and characterisation of AIII BV semiconductor quantum-size structures by MOCVD technology, Proc. of The Second Chinese-Czech Symposium Advanced Materials and Devices for Optoelectronics, 13-14 September 1999, Beijing, China, p.16-23

[44] E.Hulicius, J.Oswald, A Hospodková, J.Pangrác, P.Hazdra, A. Mackal, E. Samokhin, and T. Simecek, MOVPE grown InAs/GaAs quantum nanostructures, invited for the Annual Meeting of the Physics Society of Taiwan at the National Tung Hwa University. February 12th-14th, 2003 Da2

[45] A.Hospodková, J.Pangrác, K.Melichar, T.Hos, E.Hulicius, T.Šimeček, Properties of GaAs grown by MOVPE with different parameters of growth, poster at XXIV. International School on Physics of Compound Semiconductors Coumpound, June 1995, Jaszowiec, Poland

[46] E.Hulicius, T.Šimeček, H.Reichardt, R.Stepniewski, W.Richter, K.Melichar, J.Pangrác, T.Hos, J.Oswald, Z.Šourek, V.Vorlíček, Comparison between bubbler and direct vaporisation MOVPE grown layers of GaAs and GaAlAs, Proc. of the 7th European Workshop MOVPE, Berlin 1997 p. D1

[47] E.Hulicius, T.Šimeček, J.Pangrác, and J.Oswald, InAs/GaAs Multiple quantum -size structures grown by MOVPE, presented at EW MOVPE IX, Wrexham 2001, Proc. p. 38

[48] J. Leitner, J. Stejskal, P. Voňka, E.Hulicius, T.Šimeček, Thermodynamic modelling of the A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> mixed nitrides growth by MOVPE, presented at EW MOVPE IX, Wrexham 2001, Proc. p. 96

[49] E.Hulicius, O.Pacherova, J.Pangrác, A.Hospodkova, T.Simecek, K.Melichar, J.Oswald, Z.Šourek, T.Chraska, I.Vavra, and L.Ouattara, Growth of Abrupt InAs/GaAs Heterojunctions and Quantum Wells by MOVPE, presented at IC MOVPE XII, Maui, May 31st - June 3rd 2004, Proc. p. 12

[50] A.Hospodková, J.Pangrác, E.Hulicius, J.Oswald, P.Hazdra, J.Voves, A.Mačkal, O.Pacherová, K.Melichar, T.Šimeček, Improvements of InGaAs layer properties by MOVPE digital growth -

InAs/GaAs superlattices for laser active region, presented at IC MOVPE XII, Maui, May 31st - June 3rd 2004, Proc. p. postdeadline inset

### **Charakterizace nanostruktur**

- [51] K.D.Moiseev, M.P.Mikhailova, N.D.Stoyanov, Yu.P.Yakovlev, E.Hulicius, T.Simecek, J.Oswald, J.Pangrác, Electroluminescence and photoelectric properties of type II broken-gap n-In(Ga)As(Sb)/N-GaSb heterostructures, *J. Appl. Phys.* 86 (1999) 6264-6268
- [52] P.Hubík, J.Křištofik, J.J.Mareš, J.Malý, E.Hulicius, and J.Pangrác, Deep levels in GaAs due to Si doping, *J. Appl. Phys.* 88 (2000) 6488-6494
- [53] V.Vorlíček, K.D.Moiseev, M.P.Mikhailova, Yu.P.Yakovlev, T.Šimeček, E.Hulicius, Raman Spectroscopy of GaIn<sub>0.16</sub>AsSb solid solutions lattice-matched to InAs, *Cryst. Res. Technol.* 37 (2002) 259-267
- [54] K.D.Moiseev, M.P.Mikhailova, Yu.P.Yakovlev, T.Šimeček, E.Hulicius, J.Oswald, Photoluminescence of GaIn<sub>0.06</sub>AsSb solid solutions lattice-matched to InAs, *Opt. Mat.* 19 (2002) 455-59
- [55] J.Toušková, D.Kindl, E.Samochin, J.Toušek, E.Hulicius, J.Pangrác, T.Šimeček, Z. Výborný, Charge transport study and spectral response of GaSb/GaAs heterojunct. prepared by MOVPE, *Solar Energy Mat. and Sol. Cels* 76 (2003) 135-45
- [56] J.Toušková, D.Kindl, B.Blahitka, J.Toušek, E.Hulicius, J.Pangrác, E.Samochin, T.Šimeček, Z.Výborný, Current – Voltage characteristics of GaSb homojunctions prepared by MOVPE, *Sol. State El.* 47 (2003) 1471-1478
- [57] K.D.Moiseev, M.P.Mikhailova, Yu.P.Yakovlev, J.Oswald, E.Hulicius, J.Pangrác, and T.Šimeček, Electroluminescence in a Semimetal Channel at a Single Broken-Gap Heterointerface of Type II, *Semiconductors* 37 (2003) 1185 - 1189. Translated from *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 37, No. 10, 2003, pp. 1214–1219
- [58] Kindl D., Toušková J., Hulicius E., Pangrác J., Šimeček T., Výborný Z., Hubík P., Mareš J. J., Křištofik J., Influence of growth rate on charge transport in GaSb homojunctions prepared by MOVPE, *J. Appl. Phys.* 95 (2004) 1811-1815
- [59] J.Toušek, J.Toušková, E.Hulicius, T.Šimeček, J.Pangrác, K.Melichar, Z. Výborný, V. Jurka Influence of photon recycling on Photovoltage spectra of GaSb diodes, *J. Appl. Phys.*, 95 (2004) 5104-5110
- [60] Chobola Z., Juránková V., Vaněk J., Hulicius E., Šimeček T., Alibert C. Rouillard Y., Werner. R, Noise spectroscopy measurement of 2.3 μm CW GaSb based laser diodes, *Elektronika 1* (2005), pp.70-73, Poland ISSN 0033-2089
- [61] S. Civiš, V. Horká, T. Šimeček, E. Hulicius, J. Pangrác, J. Oswald, O. Petříček, Y. Rouillard, C. Alibert, and R. Werner, GaSb based lasers operating near 2.3 μm for high resolution absorption spectroscopy, in print *Spectrochim Acta* (2005)
- [62] J. Oswald, J. Pangrác, E. Hulicius, T. Šimeček, K. D. Moiseev, M.P. Mikhailova, and Yu.P. Yakovlev, Luminescence of type II broken gap P-Ga<sub>0.84</sub>In<sub>0.16</sub>As<sub>0.22</sub>Sb<sub>0.78</sub>/p-InAs heterostructures with high mobility electron channel at the interface, accepted for *JAP* (2005)
- [63] K.D. Moiseev, A.P. Astakhova, G.G. Zebrya, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrác, K. Melichar, and T. Šimeček, Electroluminescence of AlSb/InAsSb/AlSb quantum well heterostructure grown by MOVPE, prepared for *Appl Phys Lett.* (2005)
- [64] O.Pacherová, A.Mikkelsen, L.Outara, E.Lungstren, H.Davidson, M.Cukr, E.Hulicius, J.Sadovski, J.Kanski, Zkoumání epitaxních vrstevnatých struktur metodou XSTM, 4. Sem. o metodách blízkého pole, *Láz. Bohdaneč*, 4-6.10. 2004, Proc p. 9

## Životopis

**Name:** Ing. Eduard Hulicius, CSc.  
**Born -** 22.12. 1948, Prague, Czechoslovakia.  
**Affiliation -** Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic.  
**Position -** Head of MOVPE laboratory.  
**Address -** Cukrovarnická 10, CZ-162 53 Praha 6, Czech Republic.  
Fax: +420-233 343 184, Phone:+420-220 318 576, e-mail: hulicius@fzu.cz.

### **Fields of scientific activity:**

Semiconductor lasers, LED and laser structures especially for mid-infrared wavelength region. MOVPE technology, A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> layers, heterostructures and nanostructures with emphasis on nanotechnology. Characterisation of optical, electrical and structural properties of semiconductors.

**The supervisor** of 7 diploma theses, 7 PhD or CSc theses and 2 post-doc. projects.

**Publications:** Author or co-author of more than 210 scientific publications (42 were published in international journals, to which more than 110 references (Web of Sci) appeared in the literature). Amongst them are joint papers with the University of Montpellier, University of Alberta, FTI Leningrad, Inst of Phys RuAS, University of Leipzig, HMF lab. Grenoble, RWTH Aachen, AIXTRON, TU Berlin, EPICHEM, FhI Ga-Pa, EI-SAS, and FMF-UK, FS-MU, FEE-, FJFI-, FME-CTU, J.H.IPCH, FS-VUT, ICHT, T. Blatná, IREE-CAS. 19 invited conference papers and also contributions to three books.

**Membership:** - member of the scientific and organising committee of more than 20 national or international conferences,

- member of Scientific Council of Institute of Physics of Czech Acad. of Sci., from 1994, vice chairman from 2003; member of Scientific Council of Institute of Radio and Electroengineering of CAS, from 2004,

- member of IEEE, LEOS and JČMF - chairman of its semiconductor division,  
- expert of EC for EC project evaluation and reviewing from 2001.

### **Selected study stays abroad:**

3 months stay at Lebedev Inst. - FIAN, Moscow (lab. of Profs. Eliseev and Basov) in 1977.

4 months stay at University of Alberta, Faculty of Sciences, Edmonton (lab. of Prof.

F.L. Weichman) in 1986.

1-month invitation to lectures at Indian TU: Delhi, Bombay, Bangalore, Madras in 1986.

15 times from 1 to 5 weeks in Ioffe Inst. FTI, Leningrad, St. Petersburg from 1976 to 2004.

**Grant project activities:** Contractor or co-ordinator of 20 Grant projects (EU, GAČR, GAAV, MŠMT) and in 12 others as a participant during last 12 years. The projects are from these three fields: Semiconductor lasers, LEDs and laser structures; Porous-Si and GeSi; MOVPE technology, A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> layers, structures and devices.

### **Selected international projects:**

**Contractor of:** COPERNICUS (Contr. No. CIPA-CT94-0158) (1995-1996), COSTE, LIMOVAC Proposal No. ERB 3510 PL 92 9657, Contract No. CIPA-CT93-0161, (1994-97), ITS RTD, GLADIS Proposal No 2001-35178 (2002-5).

**Participation in:** EC-PECO-CT 927839(1993-96) and INCO COPERNICUS ADMIRAL, Contr. No. BRPR CT97 0466, Project No. BE 97-4155, (1997-2000).

**Co-ordinator of:** EC European Nanotechnology Network - Index: 52 "MOVPE prepared materials and structures for electronics and optoelectronic devices" (2001- ) and EC Network of Excellence - "Photonic Integrated Components and Circuits" (ePIX) - (co-ordinator of the associated partner No. 10) - (2004-2009).

**Industrial applications and external co-operation:** more than 50 co-operations - Czech Rep., Europe, USA. Also active in introduction of optoelectronic devices into Czechoslovak industry. Active in co-operation with industry (Infineon, Nanoplus, Omnisens, ...) up till now.