

Polovodičové lasery pro spektroskopické účely

Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

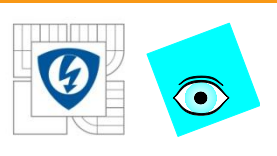
6. prosince 2012

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Historie objevu polovodičových laserů

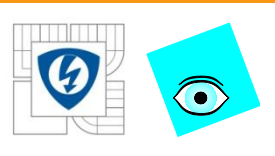
Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



Vznik laserového záření v polovodičích

- Historie objevu polovodičů generujících laserové záření – rok 1962 – první generování
 - Robert N. Hall - General Electric – generace IR v GaAs polovodiči
 - Marshall Nathan – IBM – generace IR v GaAs polovodiči
 - Nick Holonyak („Otec LED“) – General Electric – generace viditelného záření v Al dopovaném GaAs
 - Nikolaj Basov - laserování v GaAs

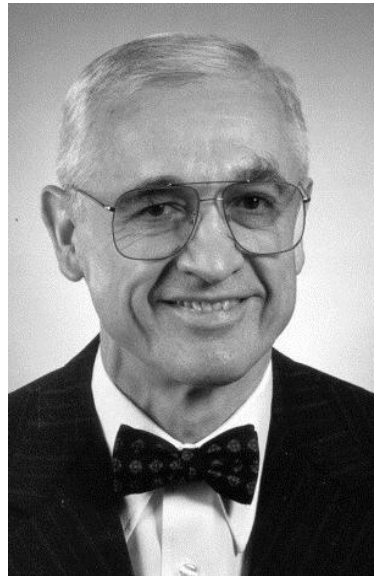


Vznik laserového záření v polovodičích

- Historie objevu polovodičů generujících laserové záření – rok 1962 – první generování



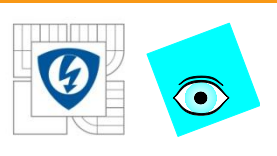
Robert N. Hall



Nick Holonyak

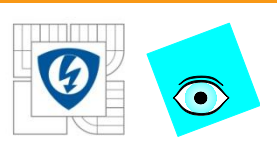


Nikolaj Basov



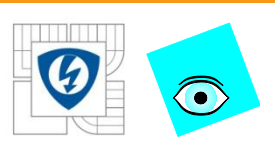
Vznik laserového záření v polovodičích

- Historie objevu polovodičových laserů – první polovodičový laser
 - jednalo se o diodu s homogenním přechodem
 - polovodič chlazen na teplotu 77 K (bod varu kapalného dusíku)
 - nezbytné budit polovodičový přechod vysokým proudem (proudová hustota v oblasti aktivní vrstvy až 1000 A/cm²)
 - napájecí zdroj polovodiče s vysokým napětím



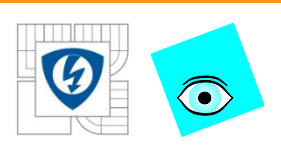
Vznik laserového záření v polovodičích

- Historie objevu polovodičových laserů
 - následně vylepšen tzv. heterostrukturou
 - aktivní vrstva tvořena polovodičem jiného složení
 - v aktivní vrstvě dochází výrazněji k hromadění párů elektron-díra
 - dosaženo laserovacího provozu za mnohem menších proudů (téměř 10x menších) a za pokojové teploty
 - Herbert Kroemer z laboratoří RCA - objevitel het.



Vznik laserového záření v polovodičích

- Historie objevu polovodičových laserů
 - Rok 1970 - Alferov a Garbuzov (SSSR) a následně Panish a Hayashi (USA) - použití tzv. dvojité heterostruktury
 - dvě jednoduché heterostruktury (P i N) tvořené stejným materiálem obklopují aktivní vrstvu z materiálu odlišného
 - Rok 2000 - Kroemer a Alferov - Nobelova cena za fyziku



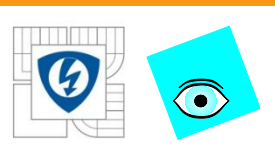
Vznik laserového záření v polovodičích – popis

Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

6.12.2012

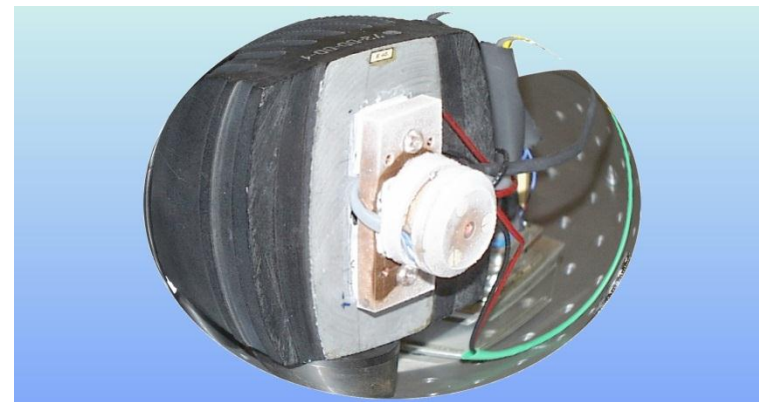
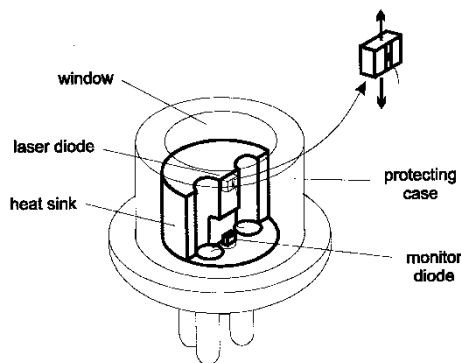
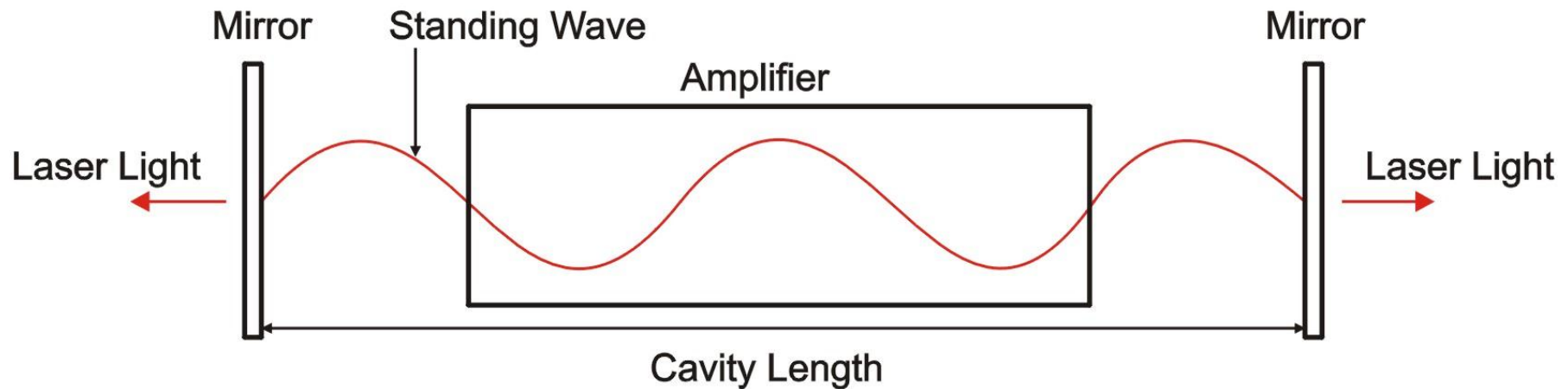
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





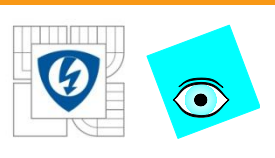
Vznik laserového záření v polovodičích

- Optická zpětná vazba optickým rezonátorem (F.P. interf.)



6.12.2012

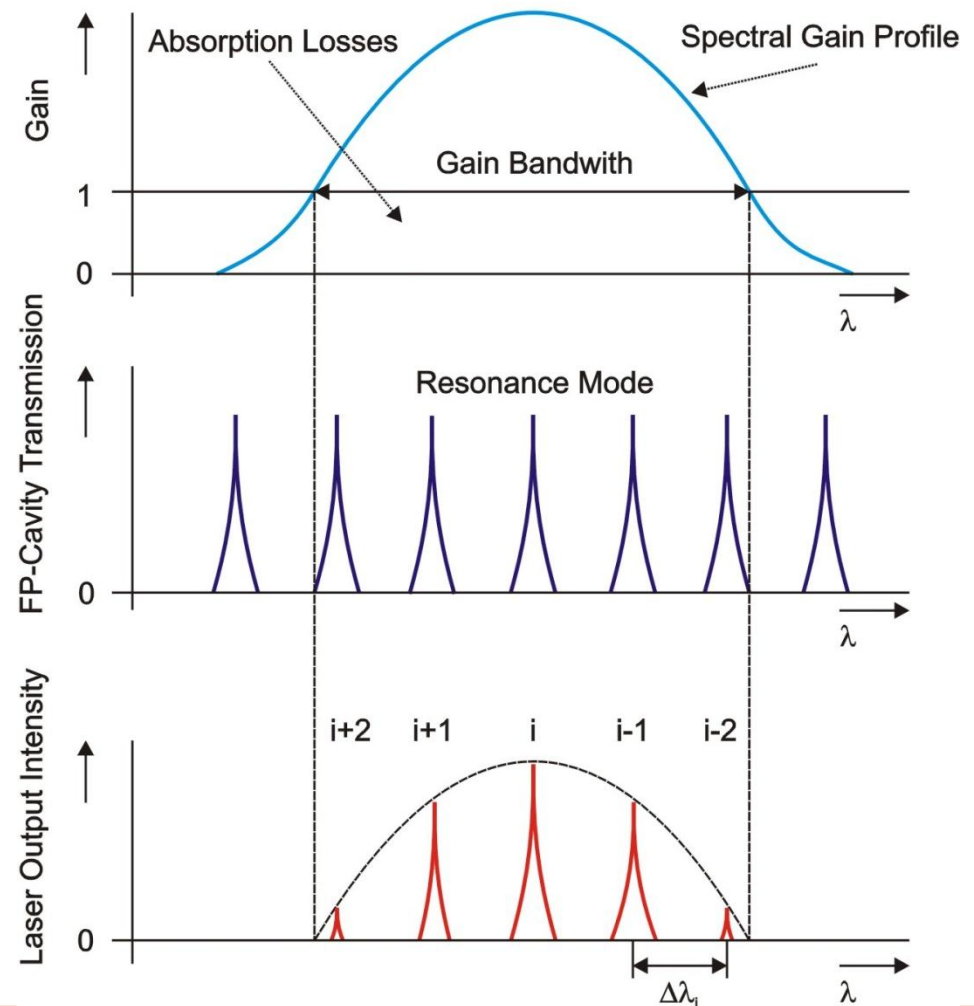
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

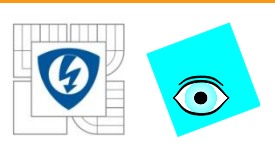


Vznik laserového záření v polovodičích

- Zesílení rezonančních frekvencí optického rezonátoru

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda_i^2}{2n_i L_x}$$





Vznik laserového záření v polovodičích

- Energetické hladiny elektronu v polovodičovém krystalu

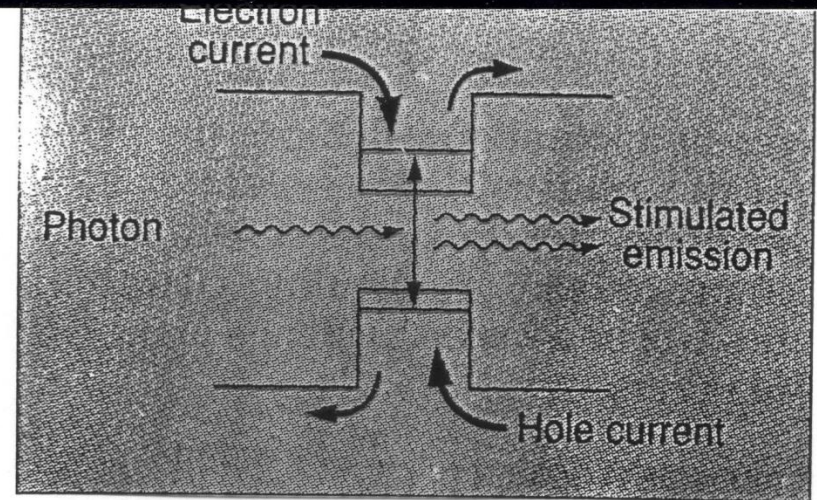
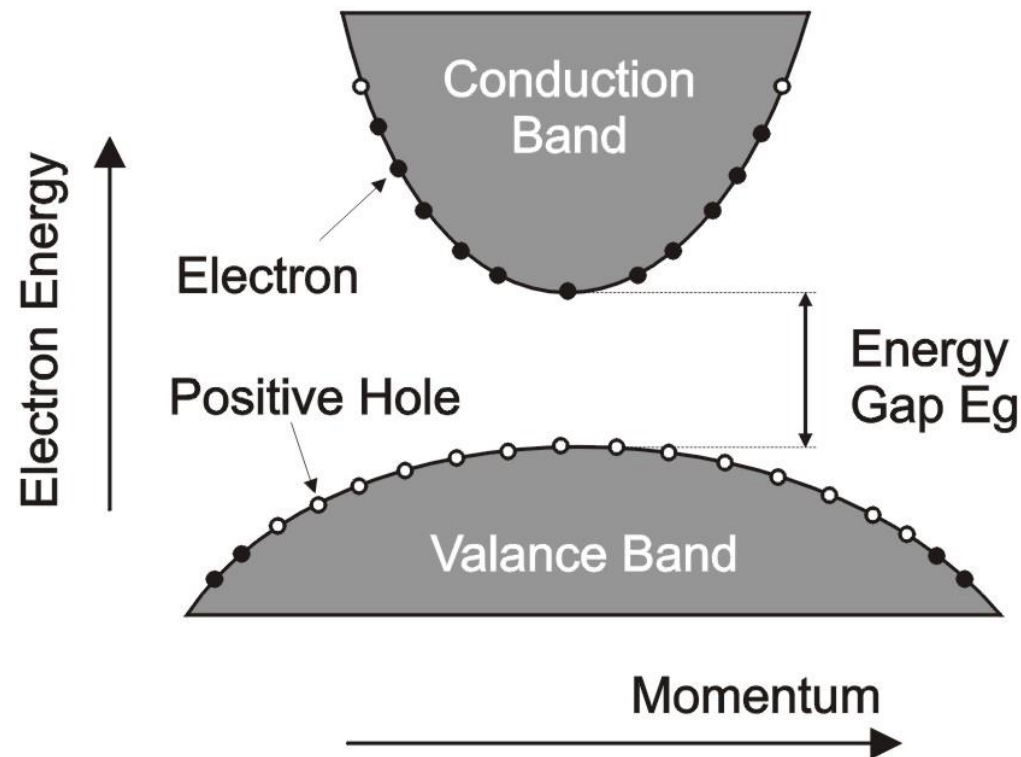
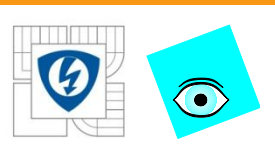
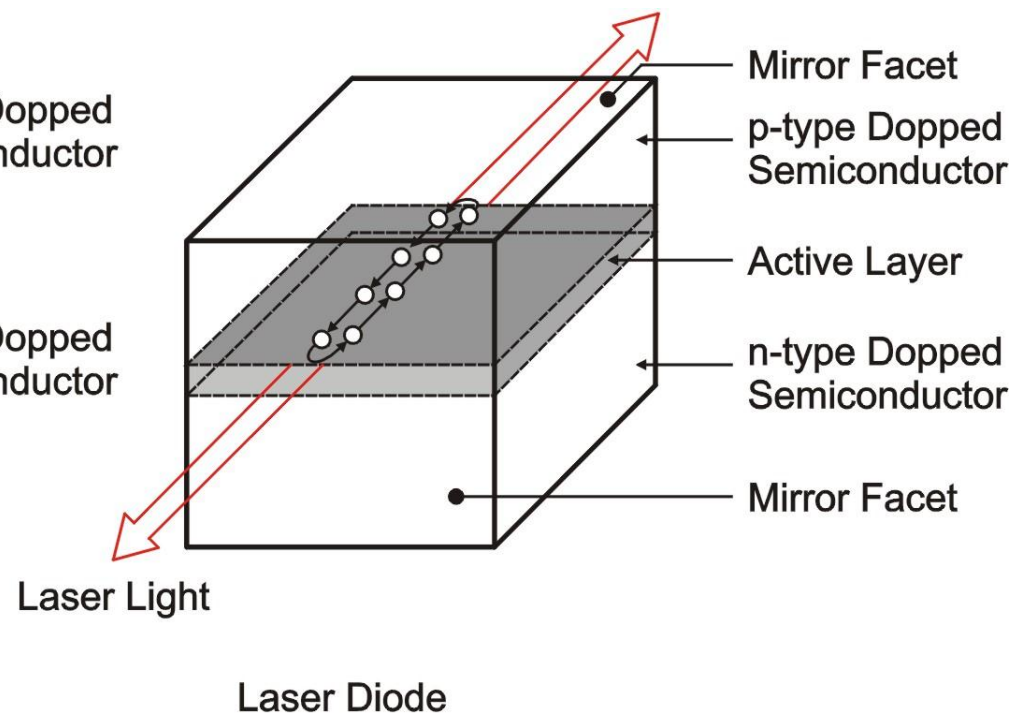
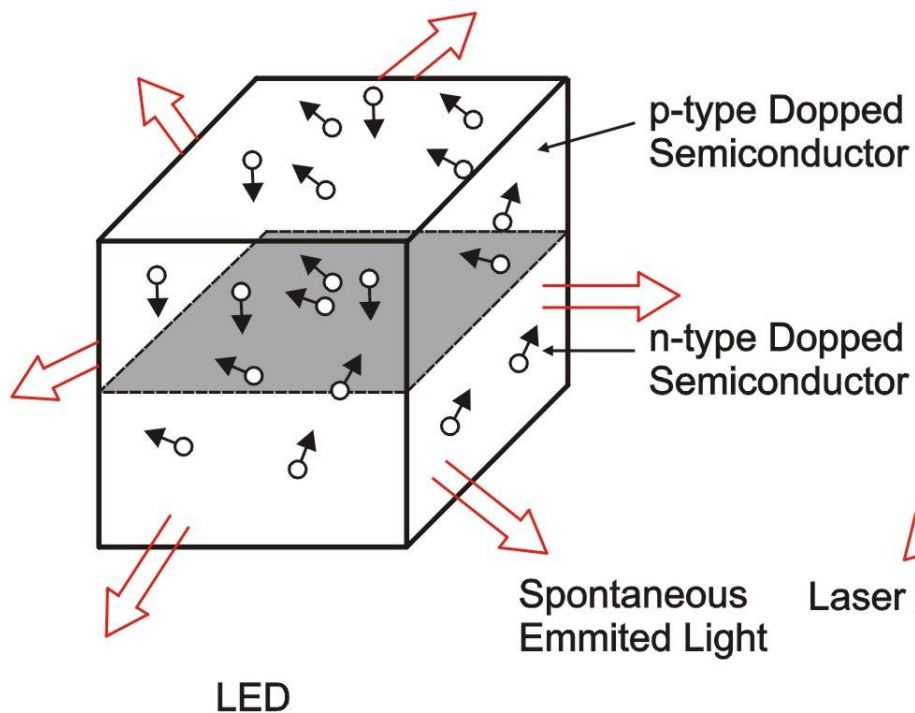


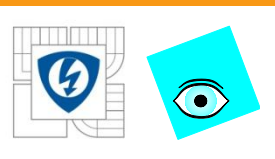
FIGURE 4. Stimulated emission happens after electrons and holes injected from cladding layers are recombined between energy states of the potential wells. Some of the carriers (thin arrows) escape to the SCH region without contributing to the process.



Vznik laserového záření v polovodičích

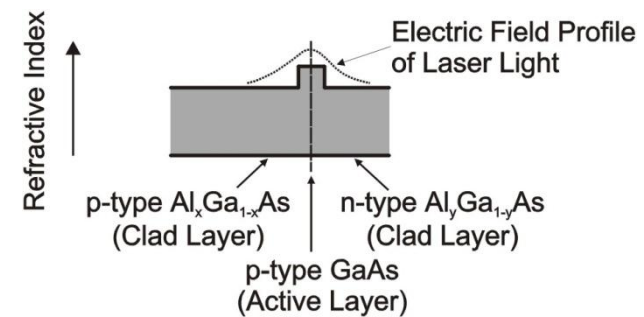
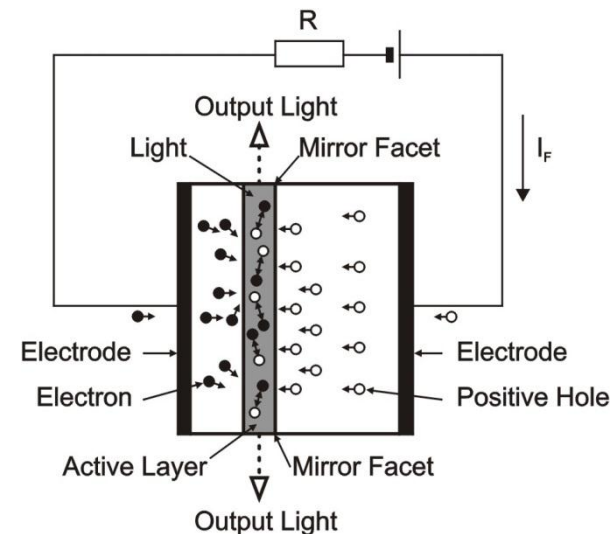
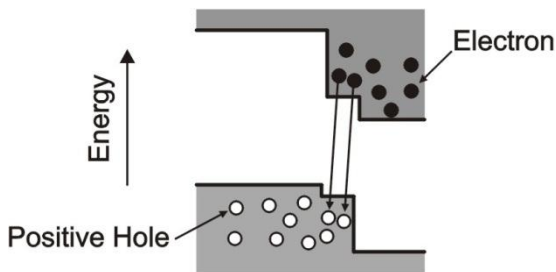
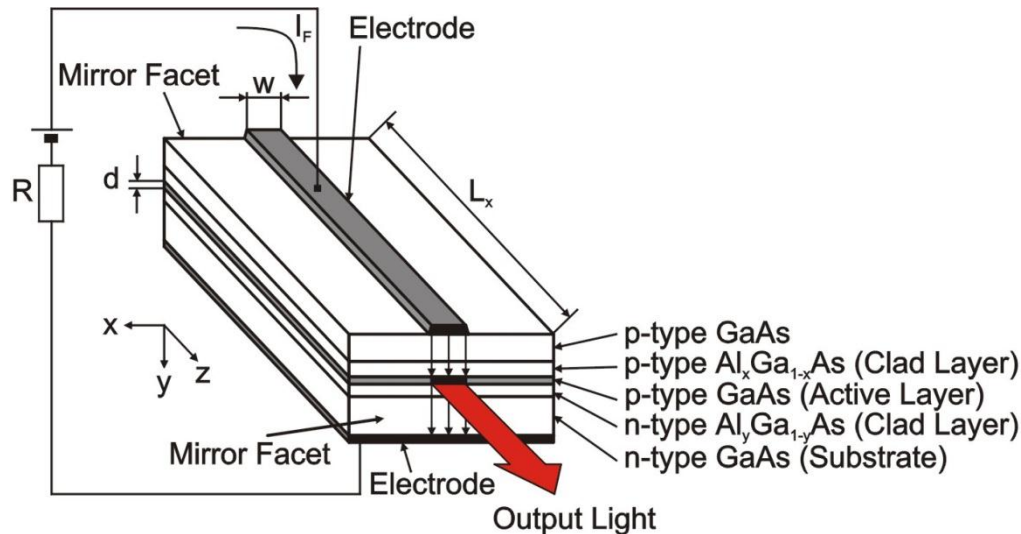
- Vznik nekoherentního záření (LED dioda) a koherentního záření (laserová dioda)

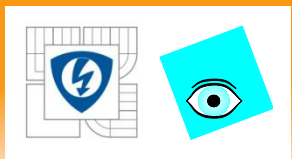




Typy struktur polovodičových laserů

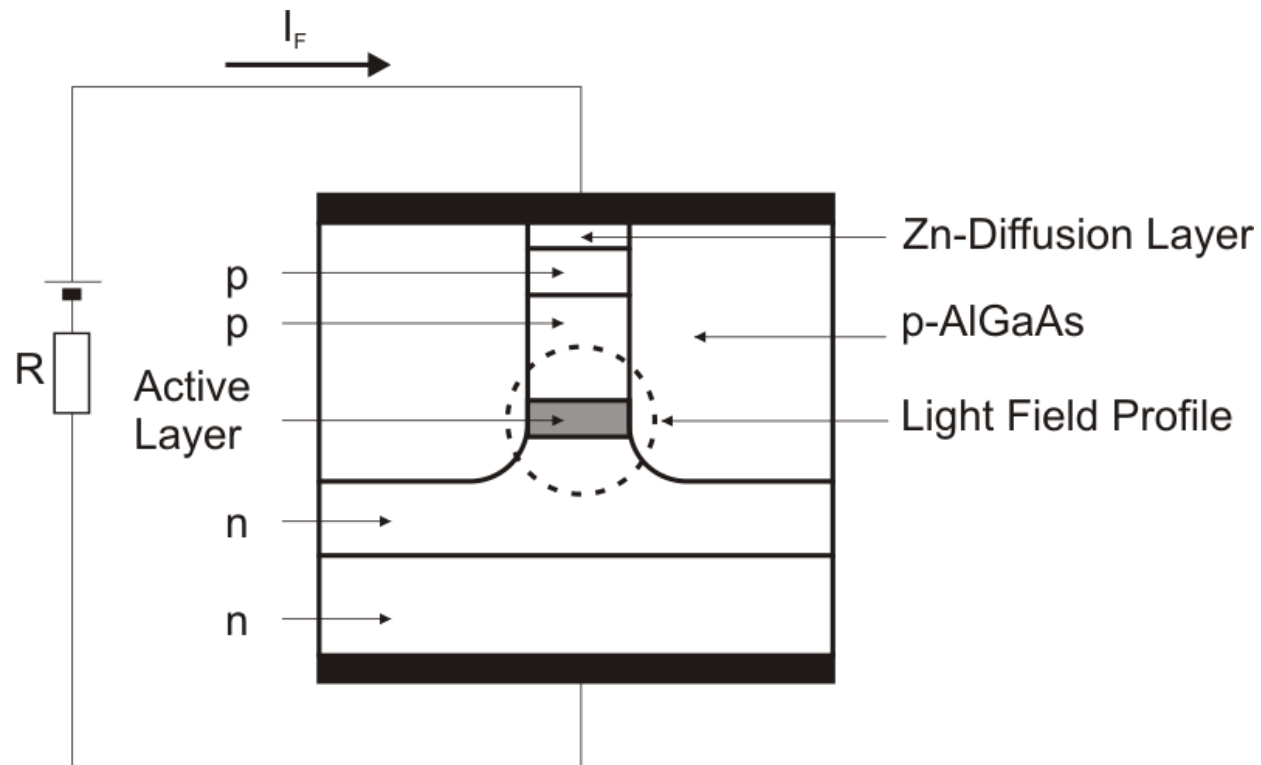
- Dvojitá heterostruktura – varianta „gain guided“.

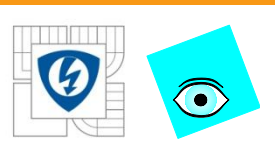




Typy struktur polovodičových laserů

- Dvojitá heterostruktura – varianta „index guided“.





Typy struktur polovodičových laserů

- Dvojitá heterostruktura – přehled vývoje

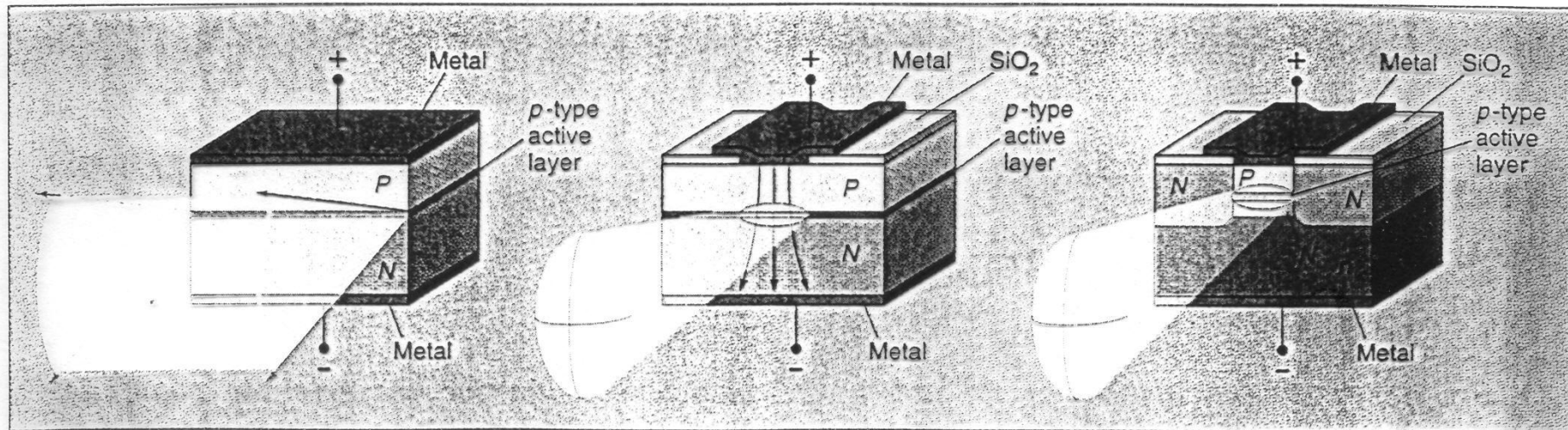
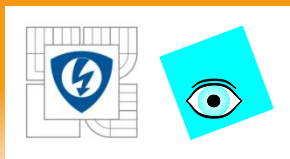
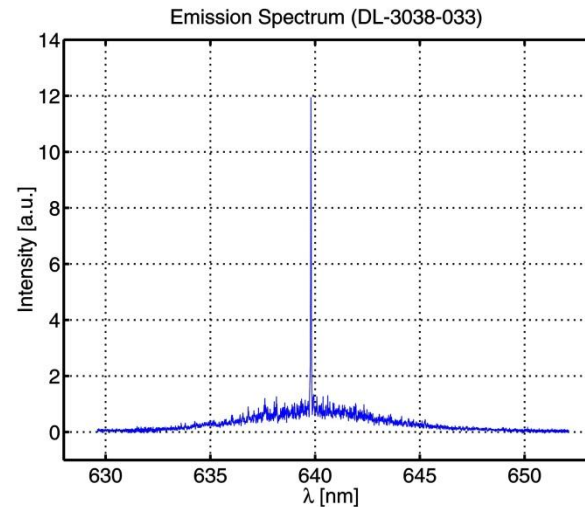
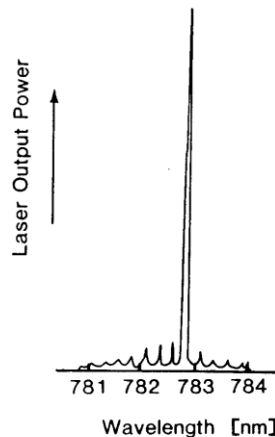
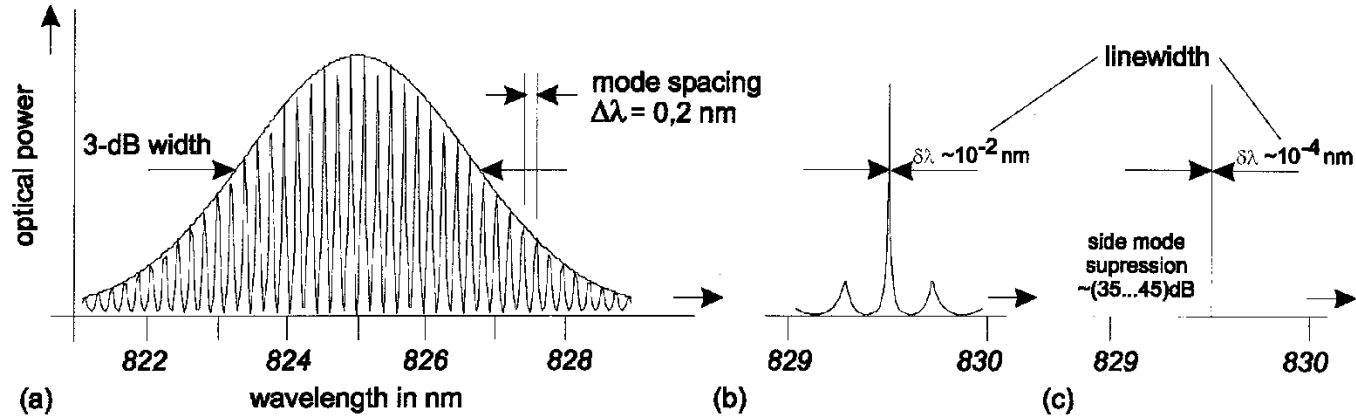


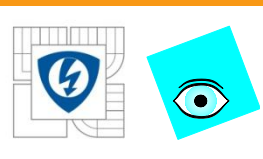
FIGURE 2. The basic double-heterostructure architecture (left) comes in two stripe geometries: gain-guided (middle) and index-guided (right). Wide-band-gap *p*- and *n*-type semiconductor materials are signified by P and N, respectively. Notice the narrow current flow (arrows) through the gain-guided structure and the beam shapes of all three structures.



Typy struktur polovodičových laserů

- Dvojitá heterostruktura – spektrální vlastnosti





Typy struktur polovodičových laserů

• Struktura na principu kvantových jam

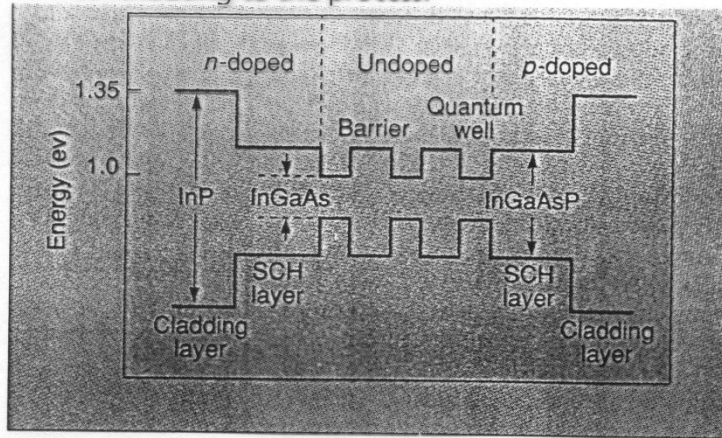


FIGURE 3. Light waves are transversely guided between two cladding layers laterally either by changes in the refractive index (index guiding) as in a ridge waveguide laser or by current injection along a longitudinal stripe contact (gain guiding) as in broad-area lasers. The addition of SCH layers provides total reflection due to stepped refractive-index variation.

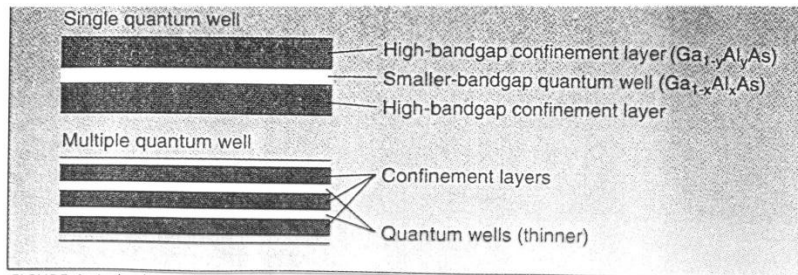
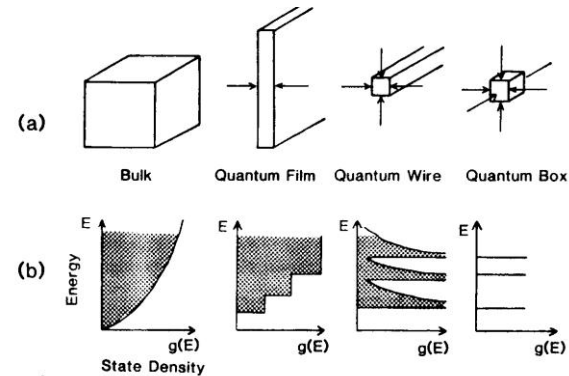
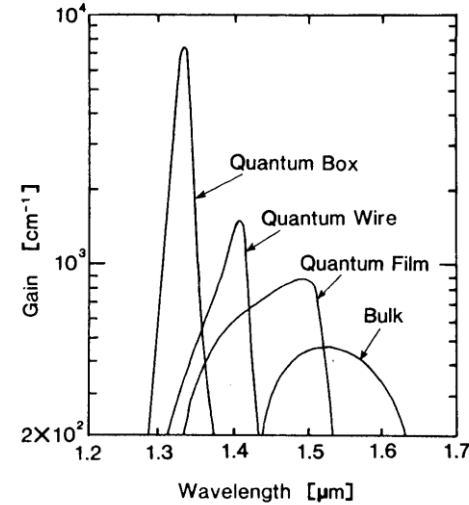
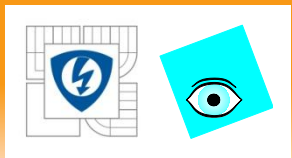


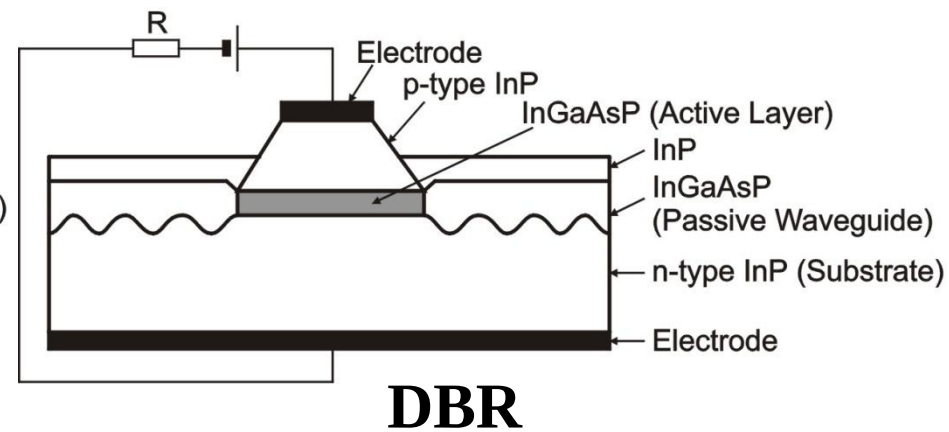
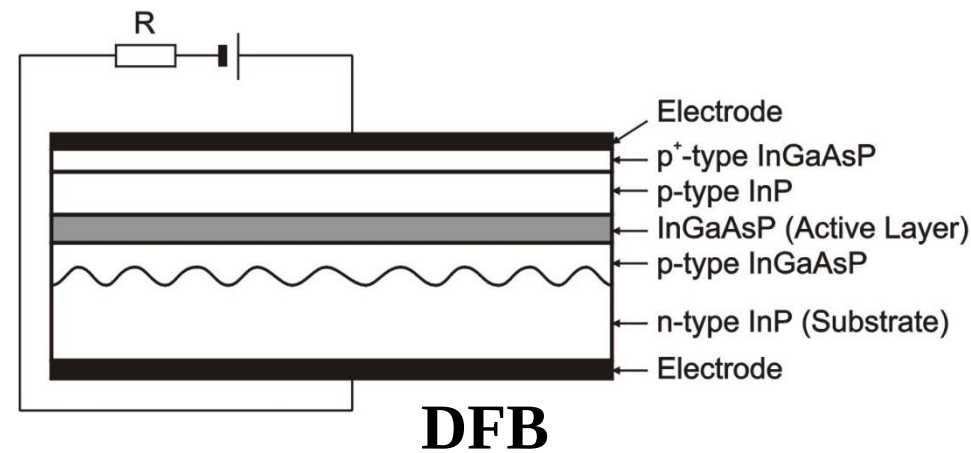
FIGURE 4. A single quantum well (top) is surrounded by thicker layers of higher-bandgap material. Multiple quantum wells also can be stacked in the active layer (bottom).

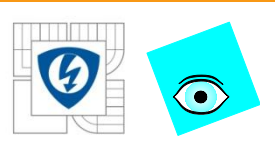




Typy struktur polovodičových laserů

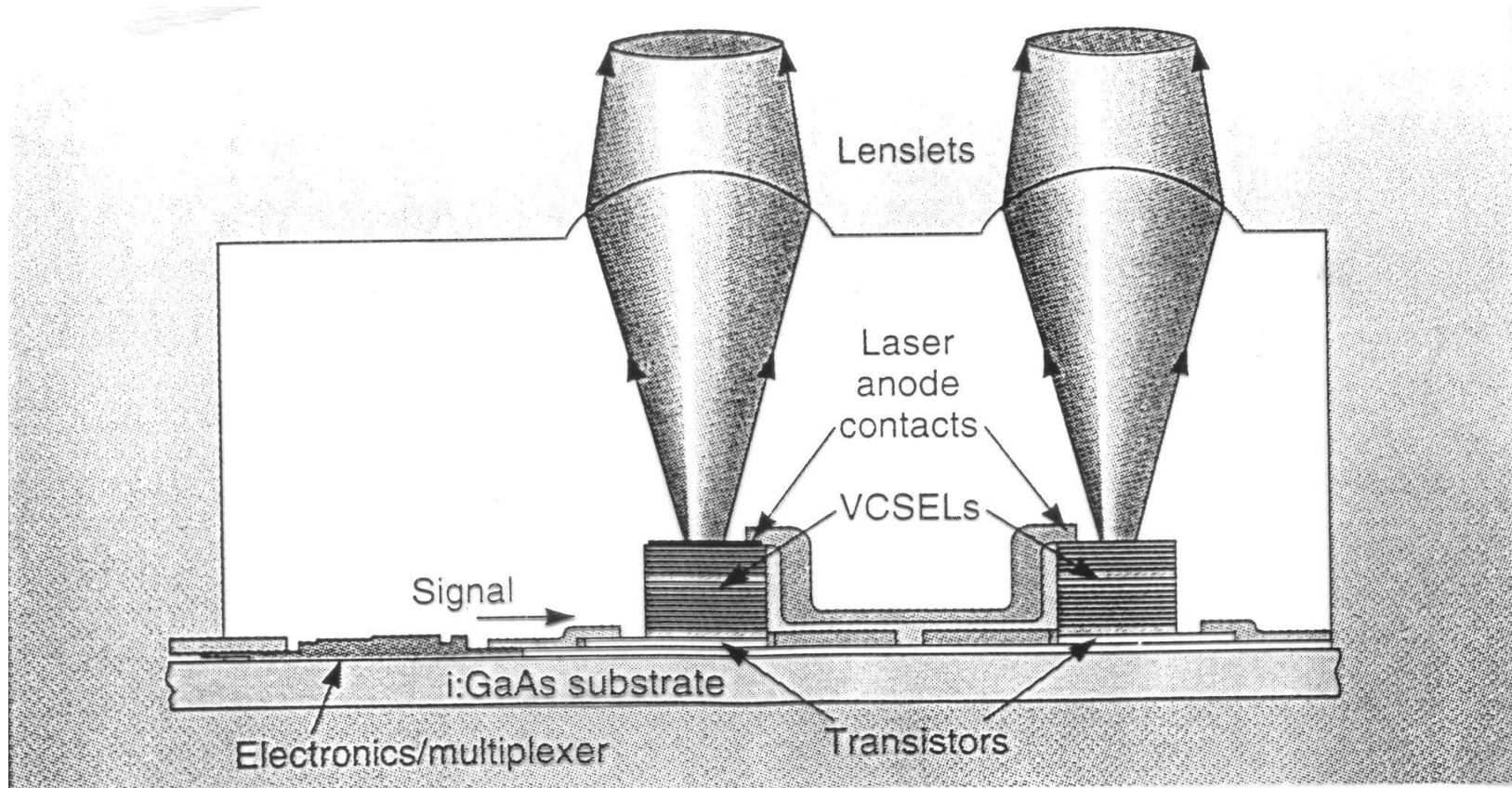
- Struktura s mřížkou ve zpětné vazbě (DFB) a Braggovým reflektorem (DBR)

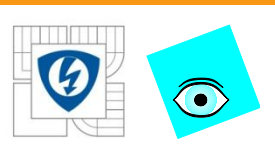




Typy struktur polovodičových laserů

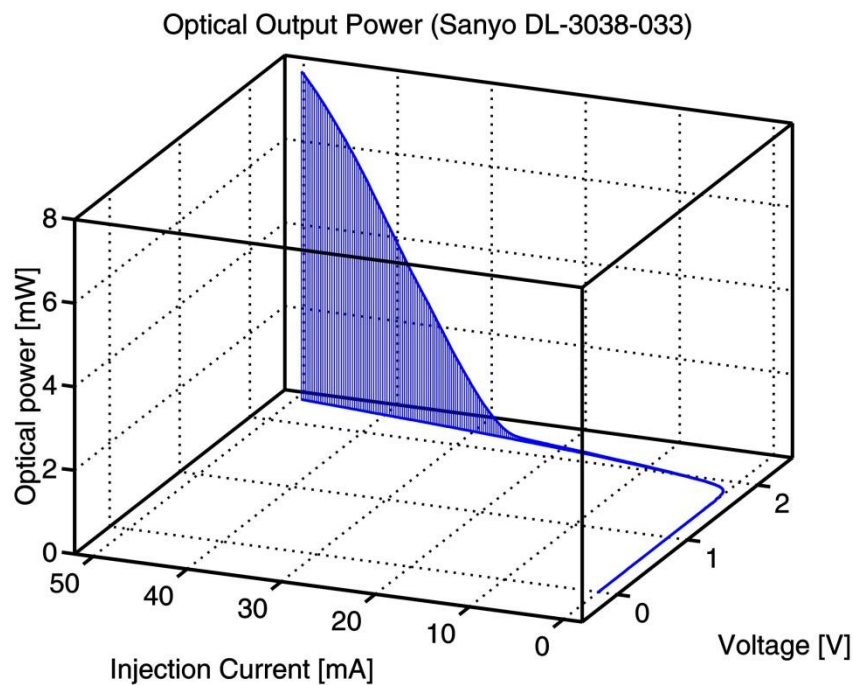
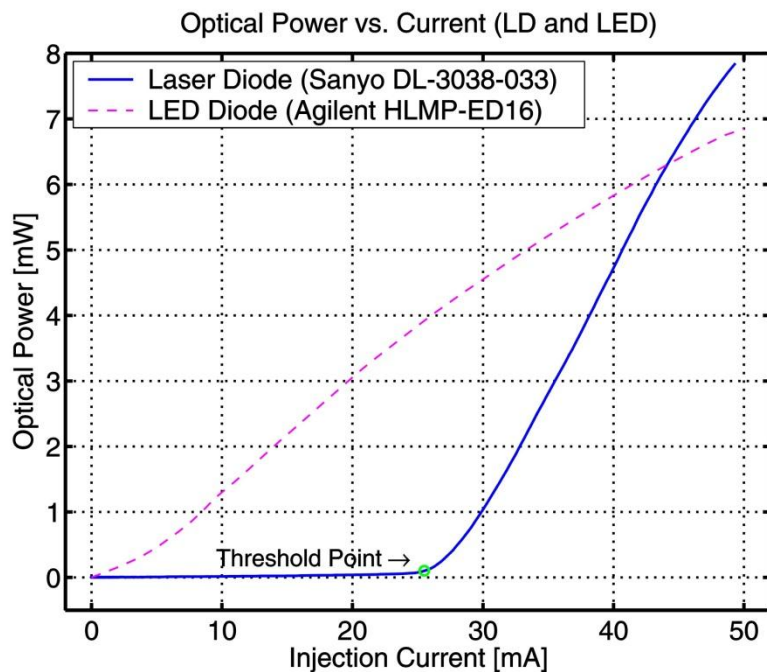
- Struktura se svislým rezonátorem (VCSEL)

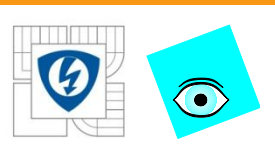




Parametry polovodičových laserů

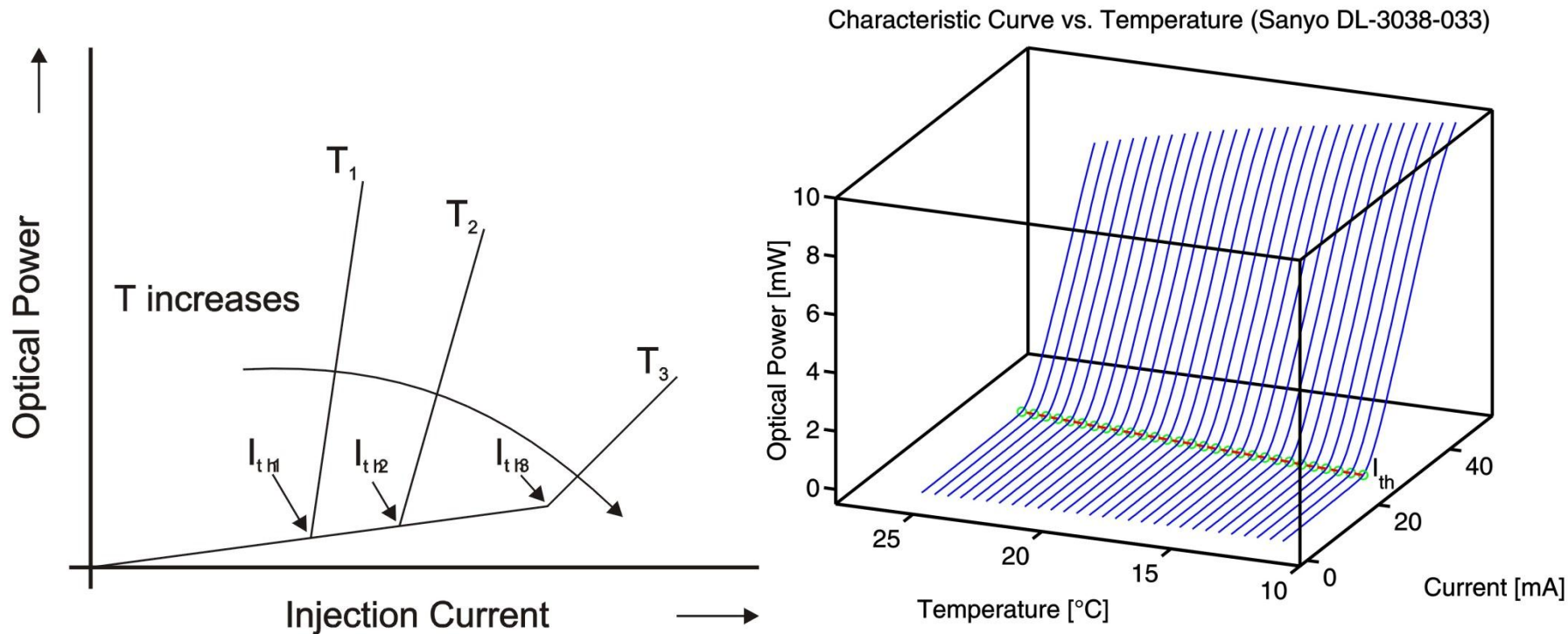
- Optický výkon v závislosti na injekčním proudu

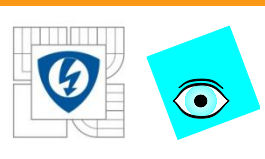




Parametry polovodičových laserů

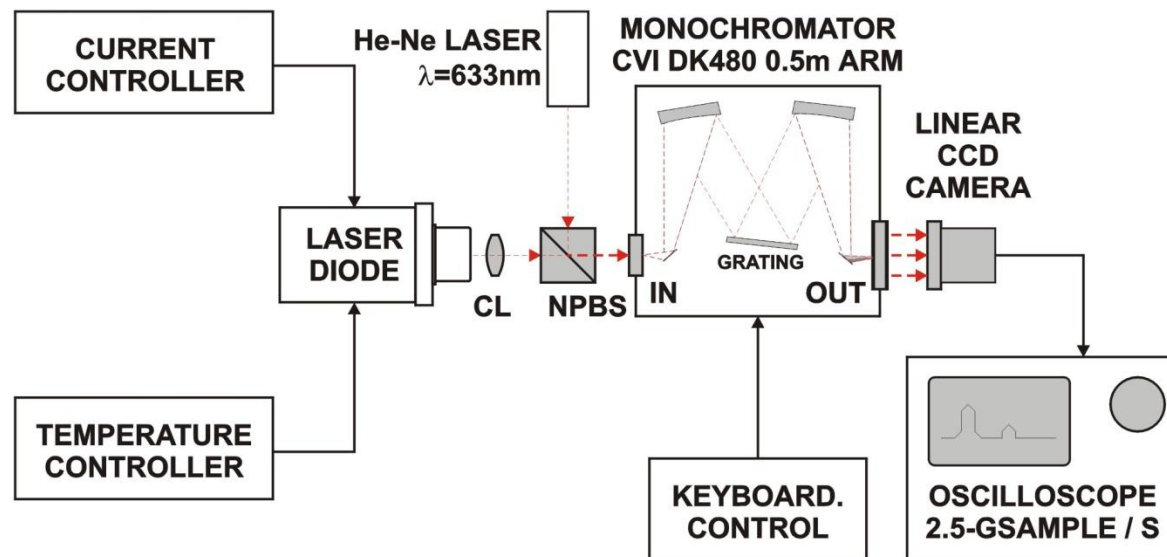
- Optický výkon v závislosti na operační teplotě

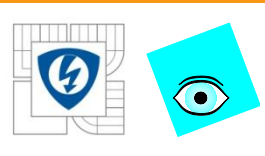




Parametry polovodičových laserů

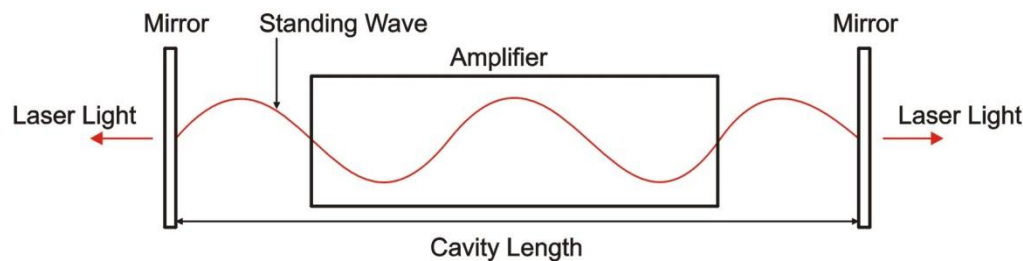
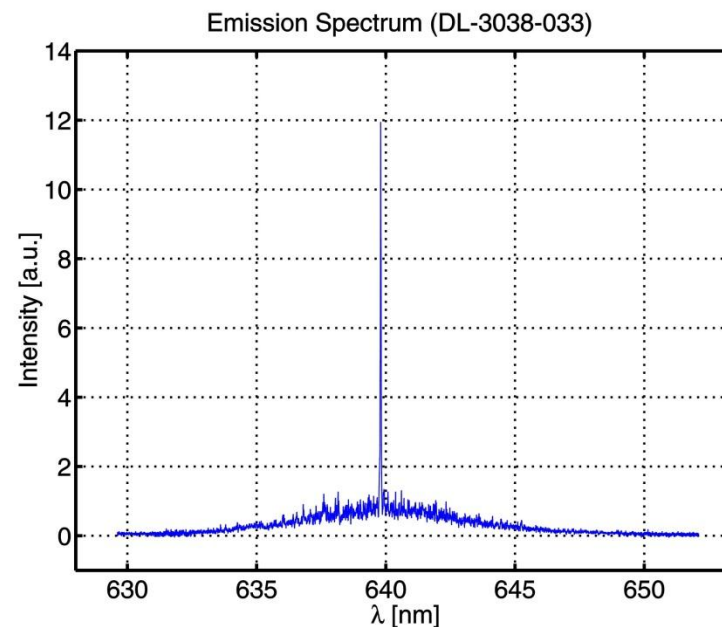
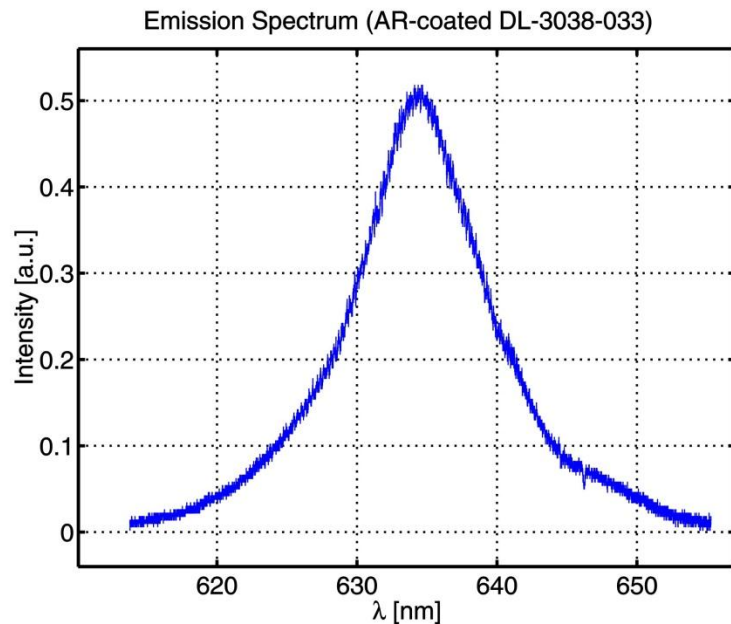
- Měřicí pracoviště pro analýzu spekter laserů I

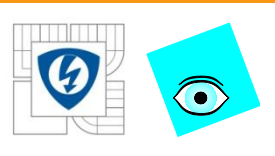




Parametry polovodičových laserů

- Spektrum zesilujícího profilu a spektrální čáry

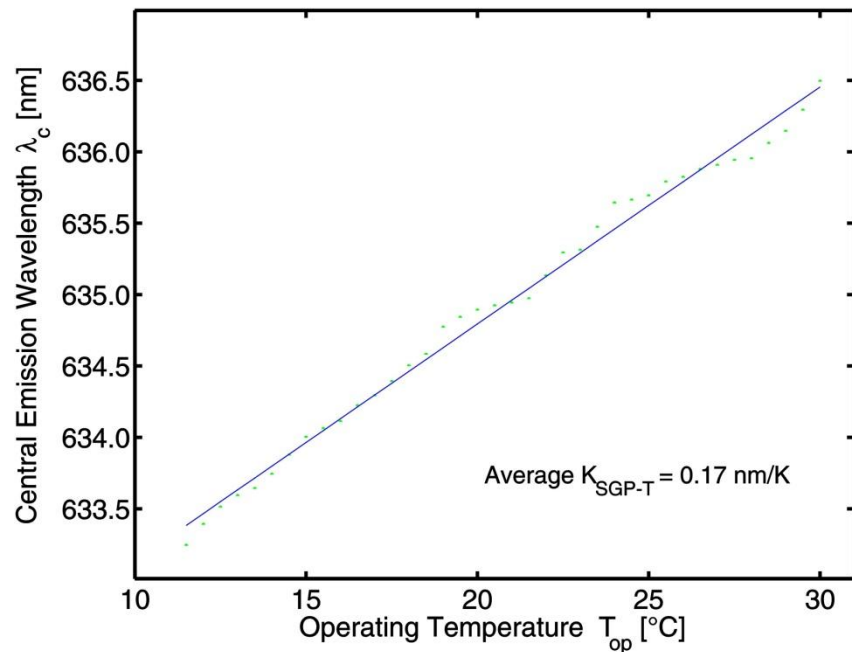




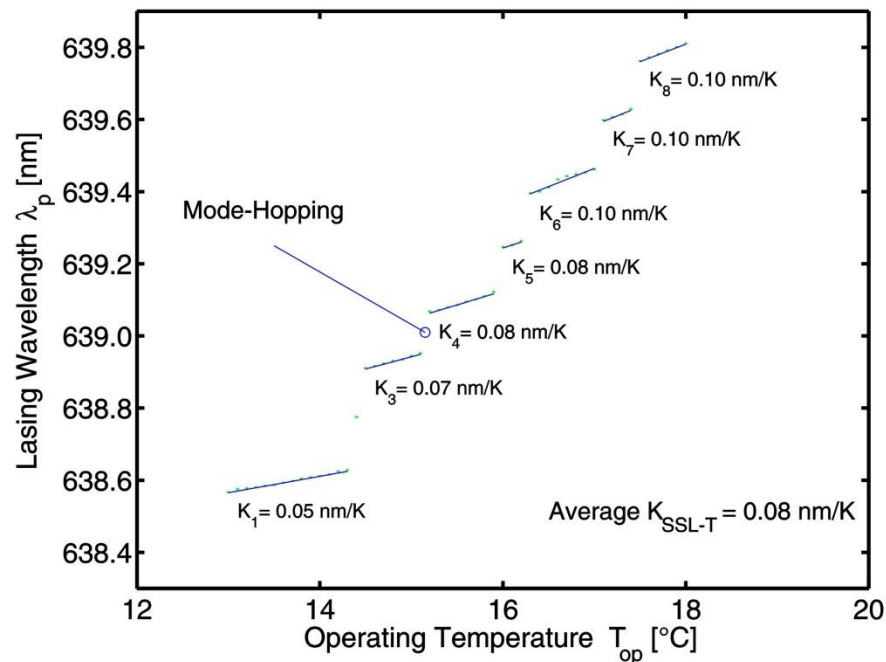
Parametry polovodičových laserů

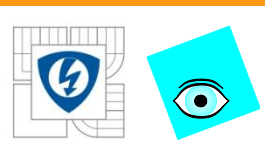
- Teplotní závislosti (profil a spektrální čára)

Spectral Gain Profile Shift vs. Temperature (AR-coated DL-3038-033)



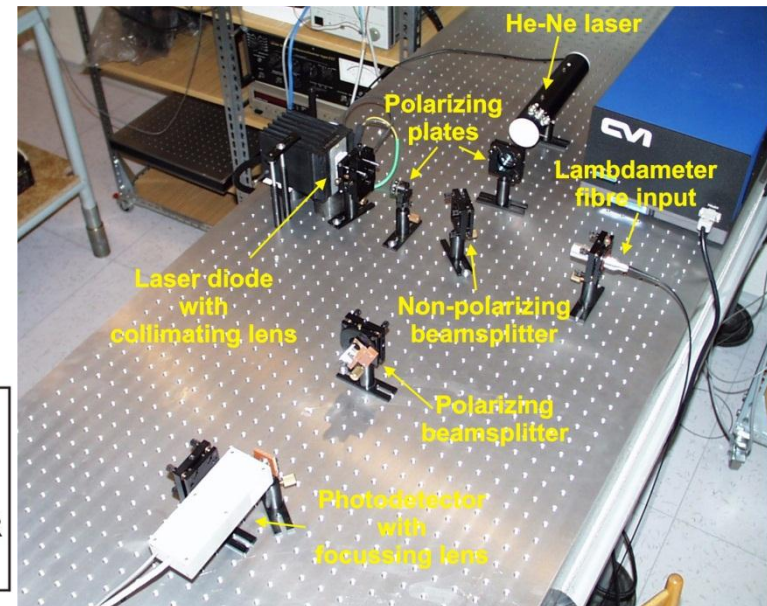
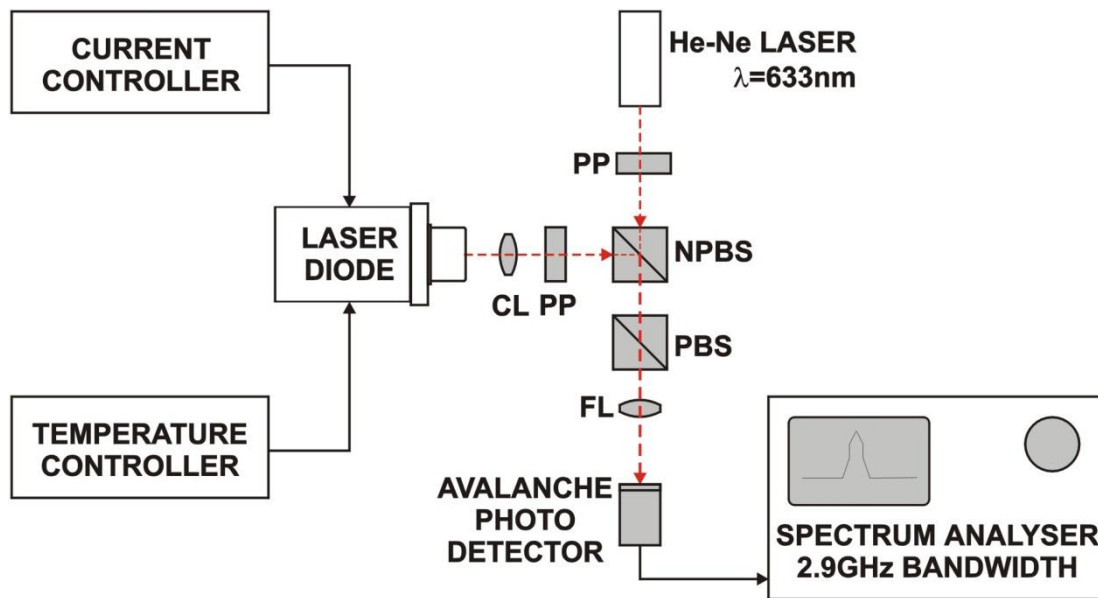
Single Spectral Line Shift vs. Temperature (DL-3038-033)

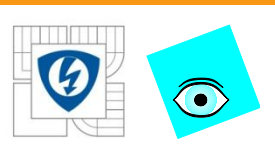




Parametry polovodičových laserů

- Měřicí pracoviště pro analýzu spekter laserů II

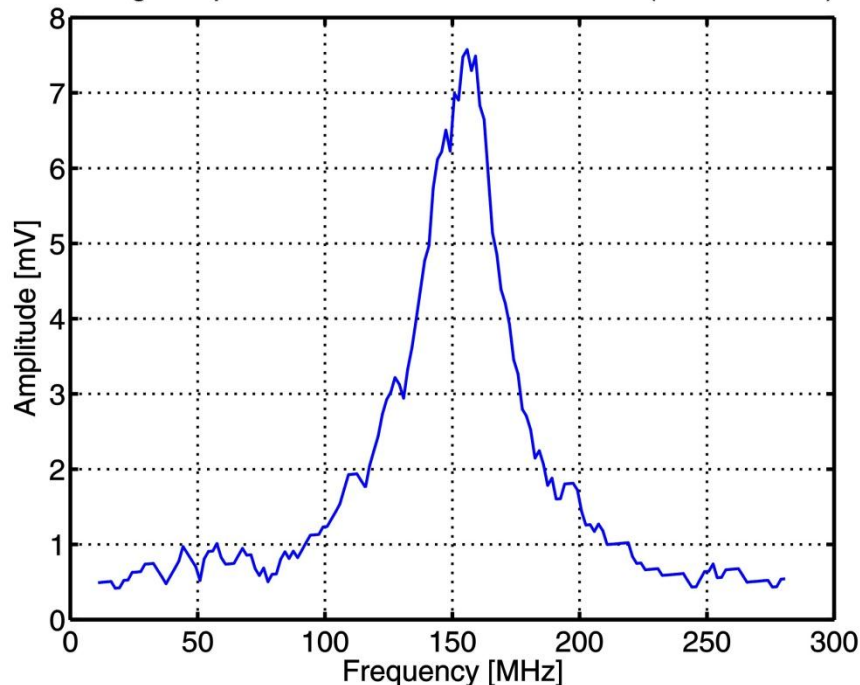




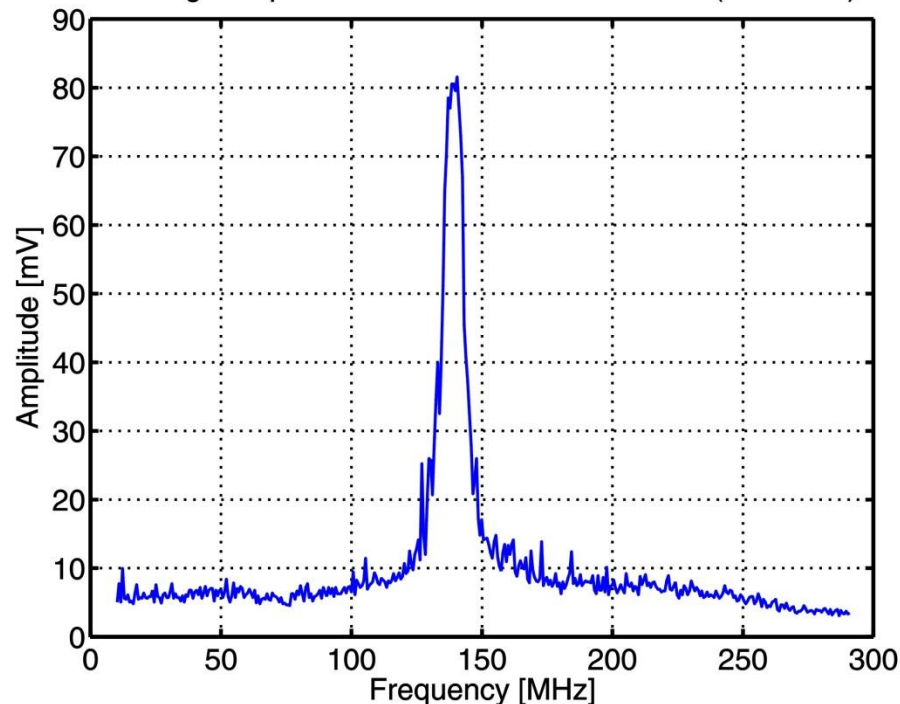
Parametry polovodičových laserů

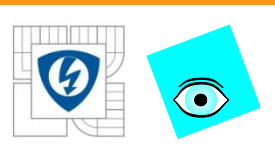
- Spektrum emisní čáry laserové diody – záznej s HeNe₂ standardem

Beat-Signal Spectrum - He-Ne vs. Laser Diode (DL-3038-033)



Beat-Signal Spectrum - He-Ne vs. Laser Diode (SDL7501)





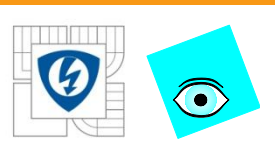
Parametry polovodičových laserů

Parametry:
laserové diody
DL-3038-033

Vlnová délka:
633 nm

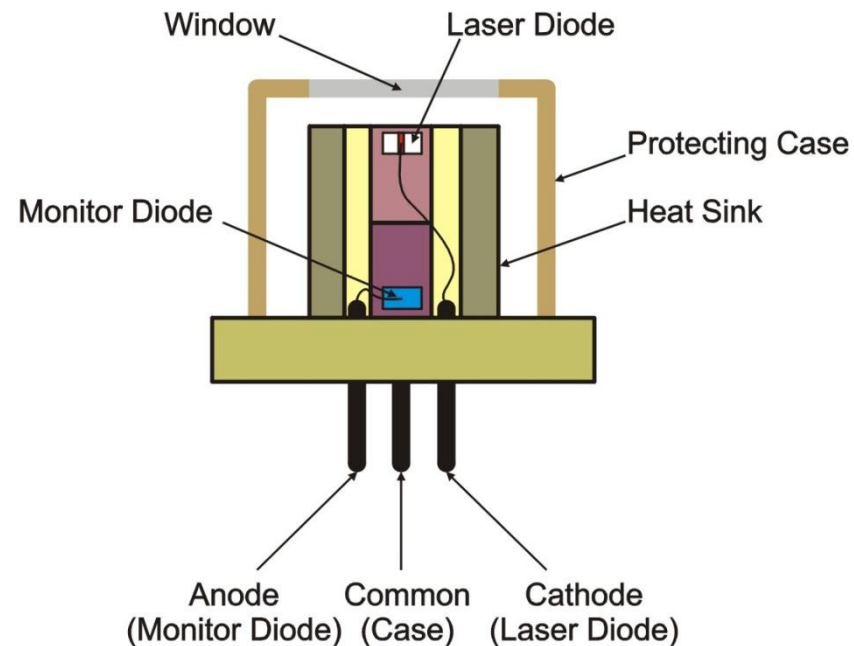
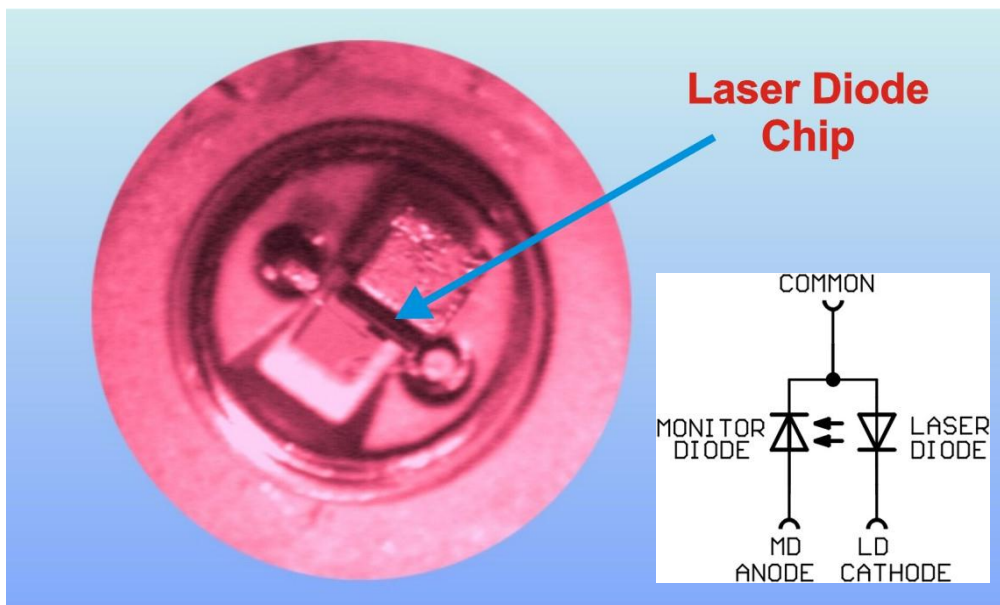
Výrobce:
SANYO

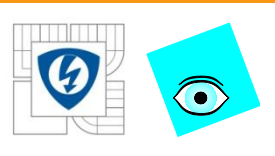
Parameter	Wavelength	Optical frequency
single spectral linewidth	4.4×10^{-5} nm	33MHz ($\tau = 50$ ms)
single spectral line vs. temperature	+0.08 nm/K	-60 GHz/K
spectral gain profile width	11 nm	8.1 THz
spectral gain profile vs. temperature	+0.17 nm/K	-127 GHz/K
spectral gain profile vs. injection current	+0.07 nm/mA	-52 GHz/mA



Parametry polovodičových laserů

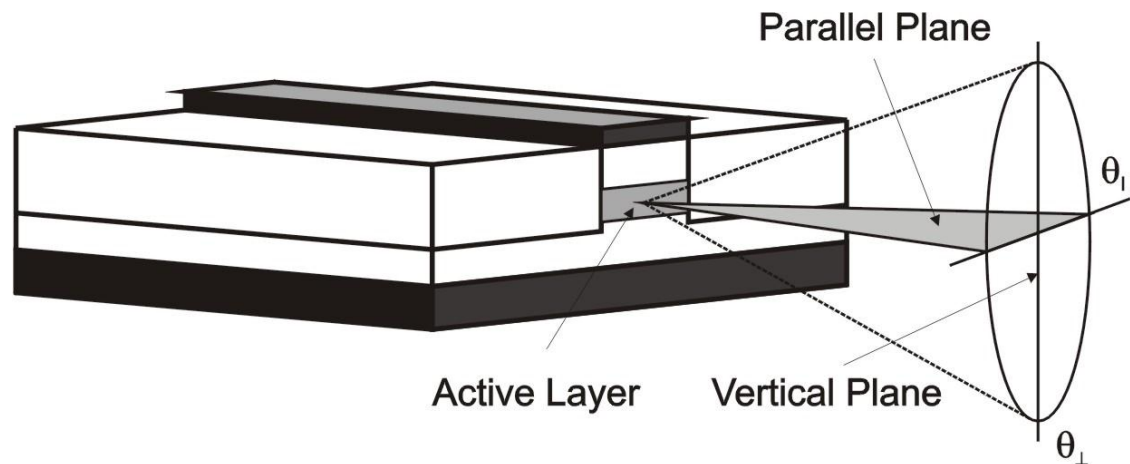
- Mechanická konstrukce laserové diody

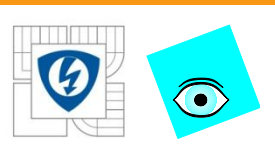




Parametry polovodičových laserů

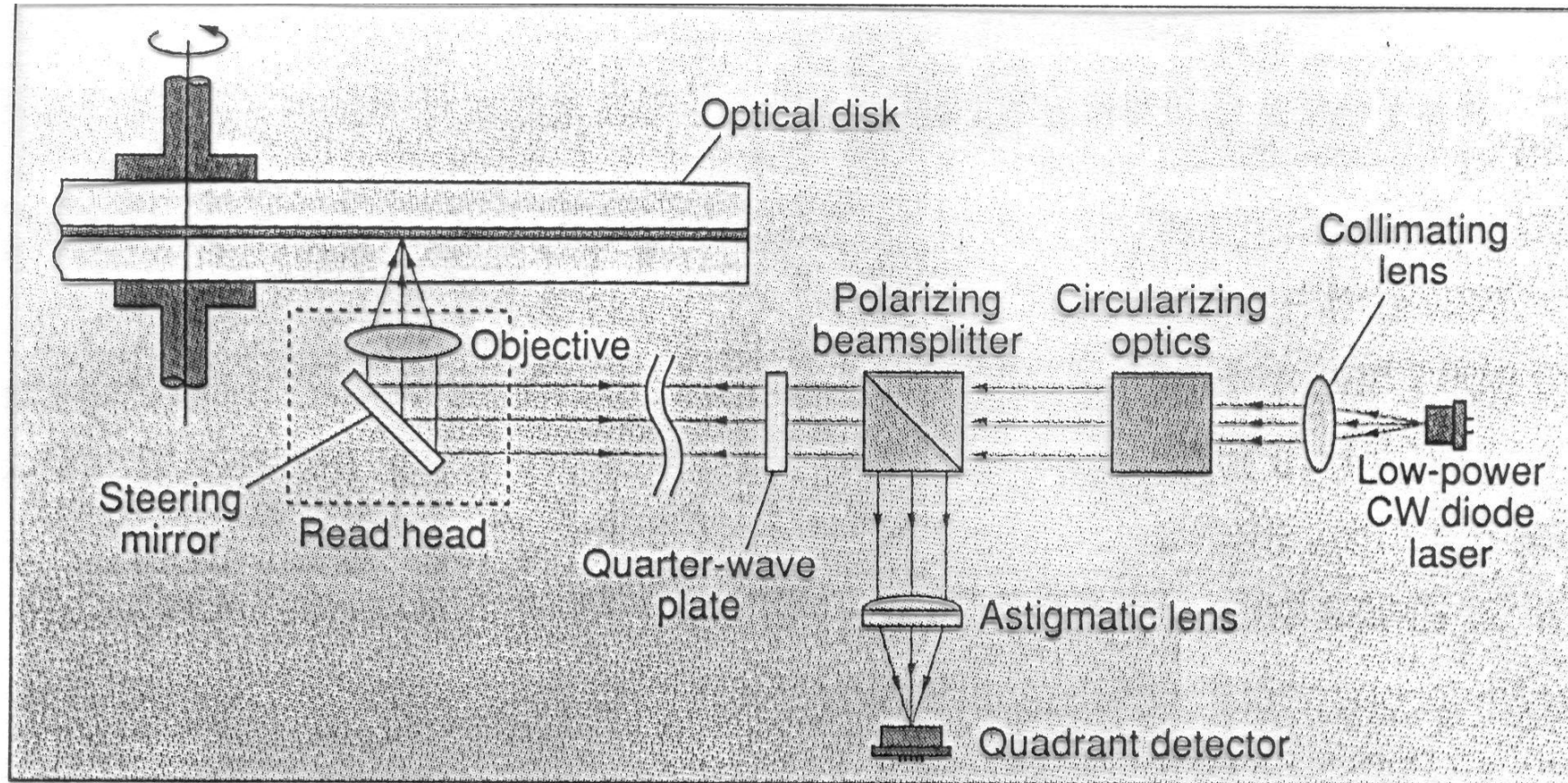
- Profil laserového svazku vystupujícího z hranově emitující laserové diody

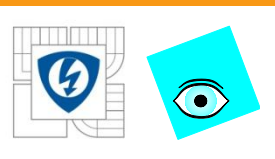




Parametry polovodičových laserů

- Aplikace laserové diody v záznamové technice





Parametry polovodičových laserů

- Aplikace laserové diody VCSEL (switche, navigace)

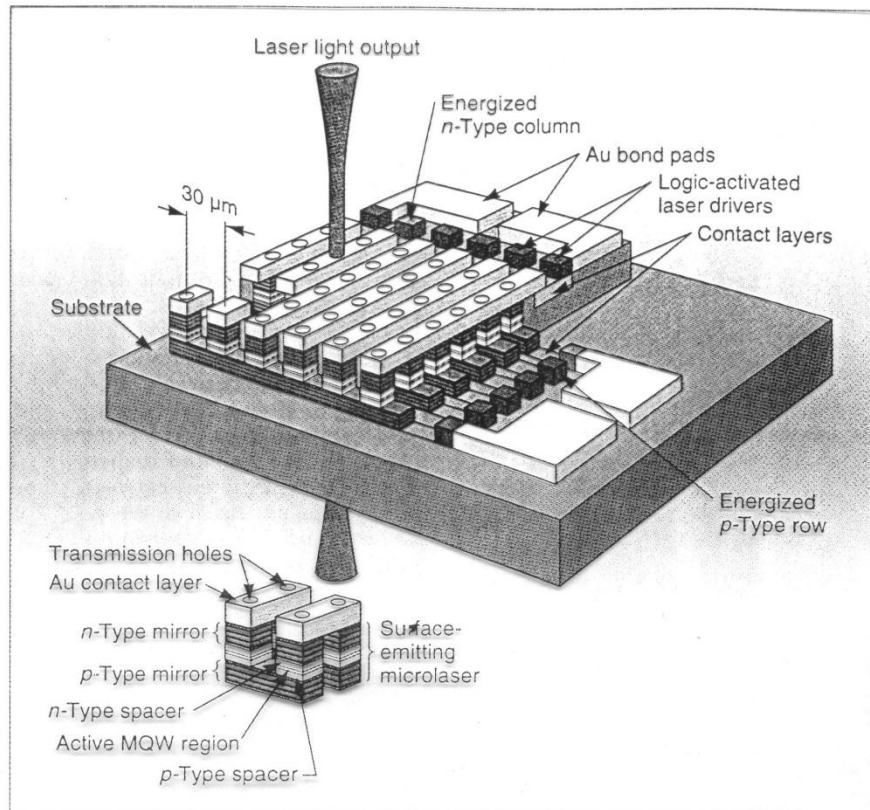


FIGURE 2. Two-dimensional VCSEL array integrates laser drivers and optoelectronic circuitry, which allows large numbers of independently controllable VCSELs with a small number of electrical contacts. (Courtesy, Sandia National Laboratories).

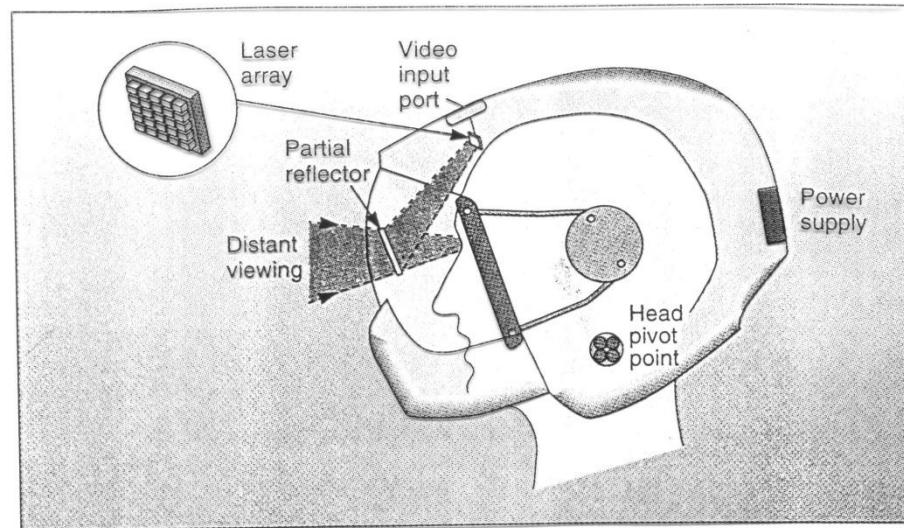
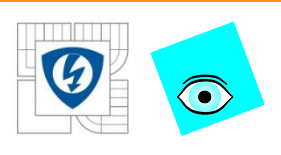


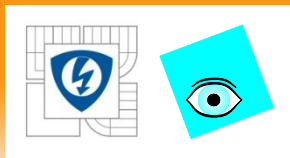
FIGURE 4. Ultralightweight, compact two-dimensional VCSEL array can be nonobtrusively mounted into a helmet for sophisticated identification, ranging, and tracking applications.



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

6.12.2012



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Základní parametry výkonových laserových diod

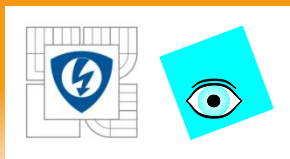
Výkon výstupního svazku – až jednotky wattů v kontinuálním režimu

Šířka aktivní oblasti – stovky mikrometrů, roste s optickým výkonem (např. 200 μm pro 3 W, 500 μm pro 7 W)

Střední vlnová délka – pro výkonové laserové diody je to typicky 780 – 980 nm. Hodnota střední vlnové délky se udává s rozptylem v řádu jednotek nanometrů.

Teplotní koeficient přeladění – typicky desetiny nanometru. S ohledem na omezenou nabídku výkonových laserových diod je tato informace důležitá v kombinaci s rozsahem provozních teplot laserové diody

Šířka emisního spektra – udává se zpravidla v nanometrech (typicky jednotky nanometrů), přičemž údaj odpovídá šířce spektrálního intervalu v místě s polovinou maximální hodnoty zjištěného spektrálního profilu (označení FWHM – Full Width at Half Maximum)



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Základní parametry výkonových laserových diod

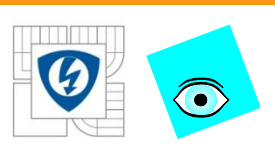
Mezní proud, maximální proud a napětí – mezní proud typicky do 1 A, provozní proud do 10 A, napětí max. 2 V

Provozní teplota, doporučený rozsah – typicky od 15°C do 35°C

Rozbíhavost svazku – v rychlé ose (horizontální) desítky stupňů, v pomalé ose (vertikální) pak jednotky stupňů

Doporučené chlazení – uvádí se způsob chlazení, u nižších výkonů zpravidla kontaktní, u vyšších bývá nutné vodní chlazení. Standardně se udává i doporučovaný výkon, na který by měl být použitý chladič dimenzován.

Typ pouzdra – výrobci zpravidla umožňují výběr různých pouzder pro laserovou diodu stejných parametrů, uživatel pak volí podle aplikace nejvhodnější variantu.



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

780 to 830 nm Devices

Laser Diodes Single-Stripe CW Devices

DEVICE SPECIFICATIONS

Optical Specifications¹

	S-λ-650C-50-x	S-λ-1200C-100-x	S-λ-1600C-100-x	S-λ-2000C-150-x	S-λ-3000C-200-x
CW Output Power	650 mW	1200 mW	1600 mW	2000 mW	3000 mW
Center Wavelength ²	780 to 830 nm	780 to 830 nm	780 to 830 nm	780 to 830 nm	780 to 830 nm
Center Wavelength Tolerance	±3 nm	±3 nm	±3 nm	±3 nm	±3 nm
Emitter Area	50 x 1 μm	100 x 1 μm	100 x 1 μm	150 x 1 μm	200 x 1 μm
Spectral Width ³	<2 nm	<2 nm	<2 nm	<2 nm	<2 nm
Wavelength Temperature Coefficient (typical)	0.28 nm/°C	0.28 nm/°C	0.28 nm/°C	0.28 nm/°C	0.28 nm/°C
Beam Divergence, slow axis ³	<10°	<10°	<10°	<10°	<11°
Beam Divergence, fast axis ³	<35°	<35°	<35°	<35°	<35°
Polarization	TM	TM	TM	TM	TM

Electrical Characteristics – Typical

Differential Quantum Efficiency	>1.0W/A	>1.0W/A	>1.0W/A	>1.0W/A	>1.0W/A
Total Conversion Efficiency	45%	45%	45%	45%	45%
Threshold Current	250 mA	350 mA	350 mA	500 mA	650 mA
Operating Current	900 mA	1550 mA	2550 mA	2500 mA	3700 mA
Operating Voltage	<2V	<2V	<2V	<2V	<2V
Series Resistance	0.17	0.12	0.12	0.10	0.10

Thermal Characteristics – Typical

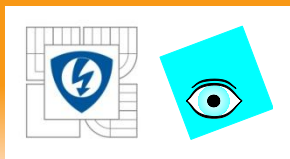
Thermal Resistance	12 to 14°C/W	10 to 12°C/W	10 to 12°C/W	8 to 10°C/W	5 to 8°C/W
Recommended Operating Temperature	-20 to 30°C	-20 to 30°C	-20 to 30°C	-20 to 30°C	-20 to 30°C

Recommended Heat Sink

Capacity ⁴	1.5W	3W	3W	6W	9W
Thermal Resistance	<0.2°C/W	<0.2°C/W	<0.2°C/W	<0.2°C/W	<0.2°C/W

Package⁵

Style Available (-x)	C, T, Q or H	C, T, Q or H	C, T, Q or H	C, T, or H	C or H
----------------------	--------------	--------------	--------------	------------	--------



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Základní parametry výkonových polí laserových diod

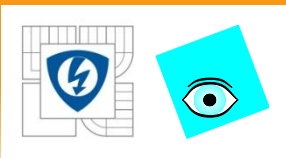
Výkon výstupního svazku – až jednotky kilowattů v kontinuálním případně v kvazikontinuálním režimu (QCW)

Počet emitorů – až desítky emitorů v rámci jednoho pole, až desítky polí v rámci jednoho stacku.

Faktor zaplnění (fill factor) – udává se v procentech a představuje poměr aktivní plochy editorů k celkové ploše pole laserových diod. Typicky bývá 50%. Tento údaj bývá někdy udáván i jako kombinace šířky emitorů a vzdáleností jejich středů, čímž lze faktor zaplnění dopočítat. Jedná se o klíčový parametr nutný pro návrh či výběr vhodné kolimační optiky.

Střední vlnová délka – pro výkonové laserové diody je to typicky 780 – 980 nm. Hodnota střední vlnové délky se udává s rozptylem v řádu jednotek nanometrů.

Teplotní koeficient přeladění – typicky desetiny nanometru. S ohledem na omezenou nabídku polí výkonových laserových diod je tato informace důležitá v kombinaci s rozsahem provozních teplot diodového pole.



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Základní parametry výkonových polí laserových diod

Šířka emisního spektra – udává se zpravidla v nanometrech (typicky jednotky nanometrů), přičemž údaj odpovídá šířce spektrálního intervalu v místě s polovinou maximální hodnoty zjištěného spektrálního profilu (označení FWHM – Full Width at Half Maximum)

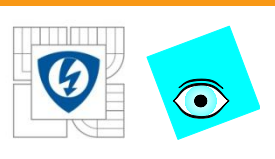
Mezní proud, maximální proud a napětí – mezní proud bývá v řádu jednotek (pole) až desítek (stack) ampér, provozní proud do desítek (pole) až stovek (stack) ampér, napětí max. 2 V (připadá na jedno pole laserových diod)

Provozní teplota, doporučený rozsah – typicky od 15°C do 35°C

Rozbíhavost svazku – v rychlé ose (horizontální) desítky stupňů, v pomalé ose (vertikální) pak typicky kolem deseti stupňů

Doporučené chlazení – uvádí se způsob chlazení, u nižších výkonů zpravidla kontaktní, u vyšších bývá nutné vodní chlazení. Standardně se udává i doporučený výkon, na který by měl být použitý chladič dimenzován.

Typ pouzdra – výrobci zpravidla umožňují výběr různých pouzder pro laserovou diodu stejných parametrů, uživatel pak volí podle aplikace nejvhodnější variantu.



Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

780-830 nm CCP

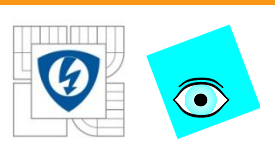
Conduction-Cooled Single Bar Package

Description	20W 30FF	30W 20FF	40W 30FF
Intended Operation Mode	CW or QCW	CW or QCW	CW or QCW
Optical Output Power (W)	20	30	40
Power if Lensed (W)	18	27	36
Center Wavelength (nm) (standard options, at 25°C)	795 ±3 808 ±3 810 ±10	808 ±3 810 ±10	790 ±3 795 ±3 807 ±3 808 ±3 810 ±10 825 ±5
Wavelength Temperature Coefficient (nm/°C)	0.28	0.28	0.28
Spectral Width (nm)	<3 <5 (810 nm)	<3 <5 (810 nm)	<3 <5 (810 nm)
Fill Factor (%)	30	20	30
Number of Emitters	19	19	19
Stripe Width (μm)	150	90	150
Polarization	TM	TM	TM
Threshold Current (A)	8 (typical)	6 (typical)	8 (typical) 9 (typical)(825 nm)
Operating Current (A)	<29 (25 typical)	<37 (33 typical)	<46 (42 typical) <48 (825nm)
Operating Voltage (V)	<2.0 (1.8 typical)	<2.0 (1.8 typical)	<2.0 (1.8 typical)
Pulse Width			
Duty Cycle (%)			
Fast Axis Divergence (°)(FWHM)	<35	<35	<35
Fast Axis Divergence if Lensed (°)(FWHM)	<1	<1	<1
Slow Axis Divergence (°)(FWHM)	<10	<10	<10
Recommended Operating Temperature (°C)	25	25	25
Recommended Operating Temperature Range (°C)	15 to 35	15 to 35	15 to 35
Storage Temperature Range (°C)	-40 to +60	-40 to +60	-40 to +60
Recommended Heat Sink Capacity (W)	70	80	100

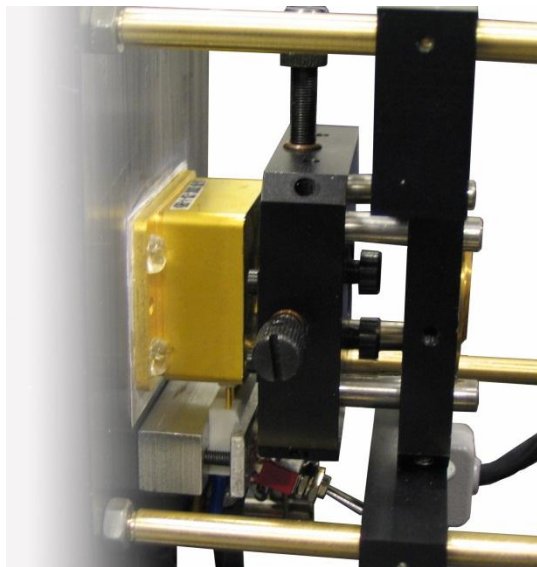
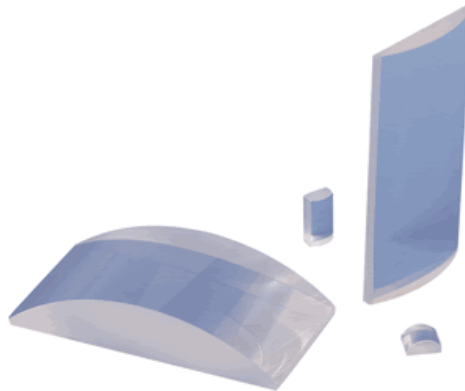
6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



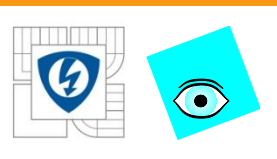


Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací



6.12.2012

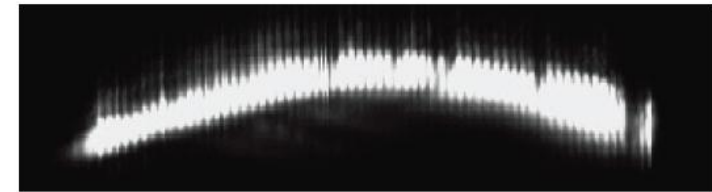
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



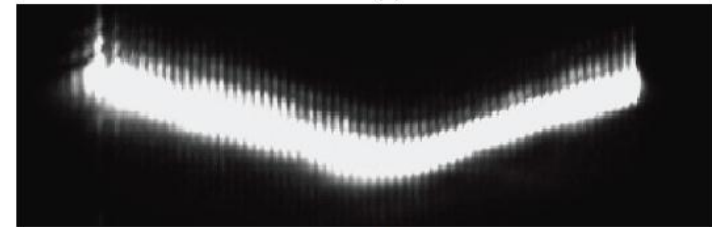
Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací



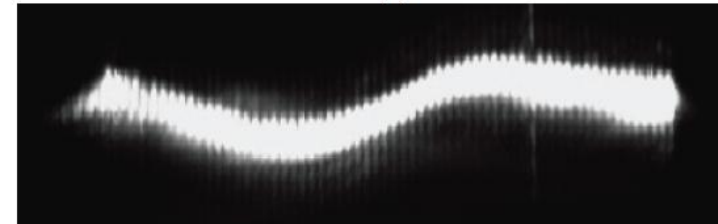
typ. 10 μm



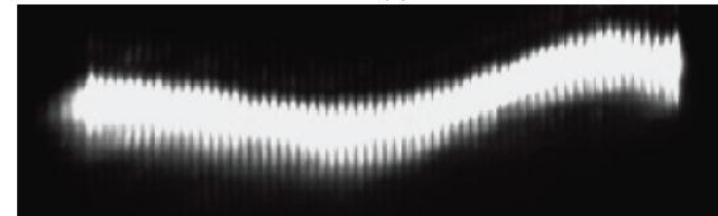
(a)



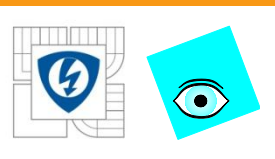
(b)



(c)



(d)

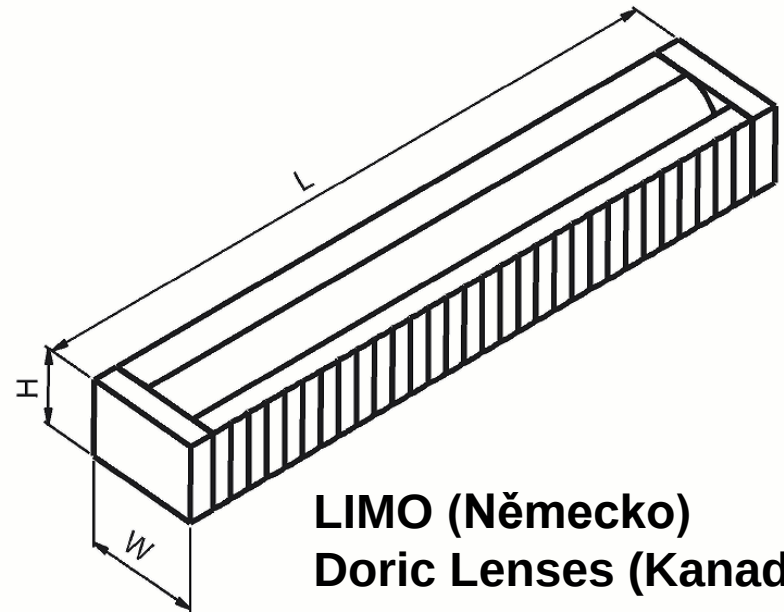
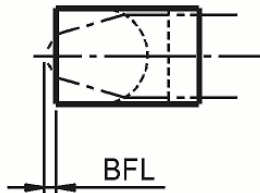


Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací



typ. $10\ \mu\text{m}$

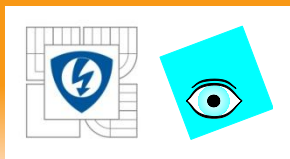
**FAC-SAC 9007.410,
LIMO GmbH**
 $H=1,5\ \text{mm}$, $L=13\ \text{mm}$
 $W=2,65\ \text{mm}$, $BFL=0,09\ \text{mm}$



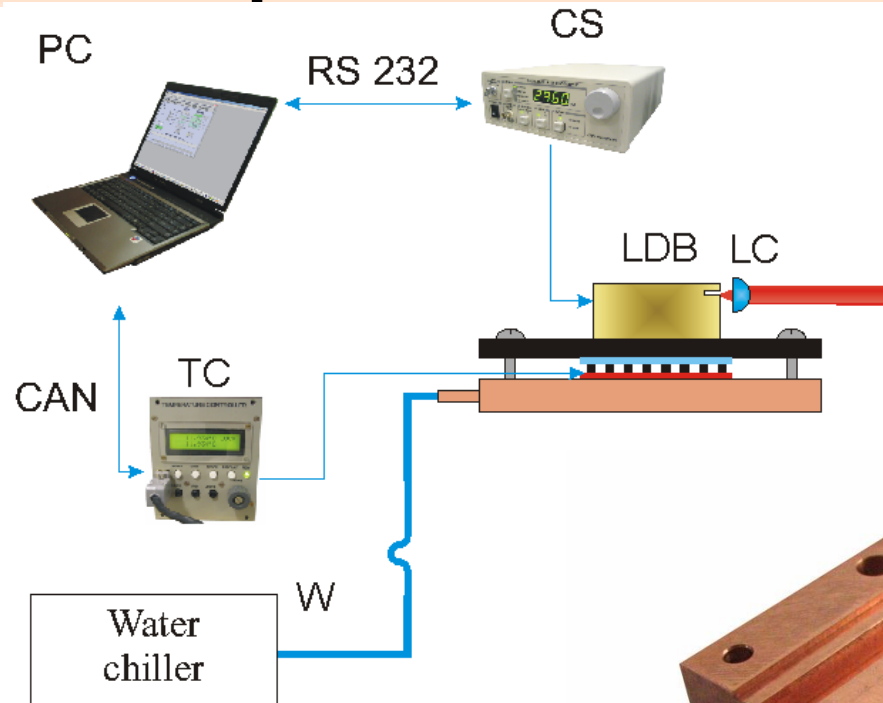
LIMO (Německo)
Doric Lenses (Kanada)

6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



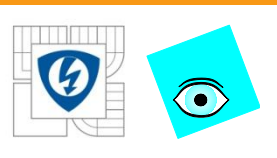
Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací



PC - řídicí počítač
CS - zdroj proudu
TC - teplotní kontrolér
LDB - pole LD
LC - kolimační optika
W - blok vodního chlazení

6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



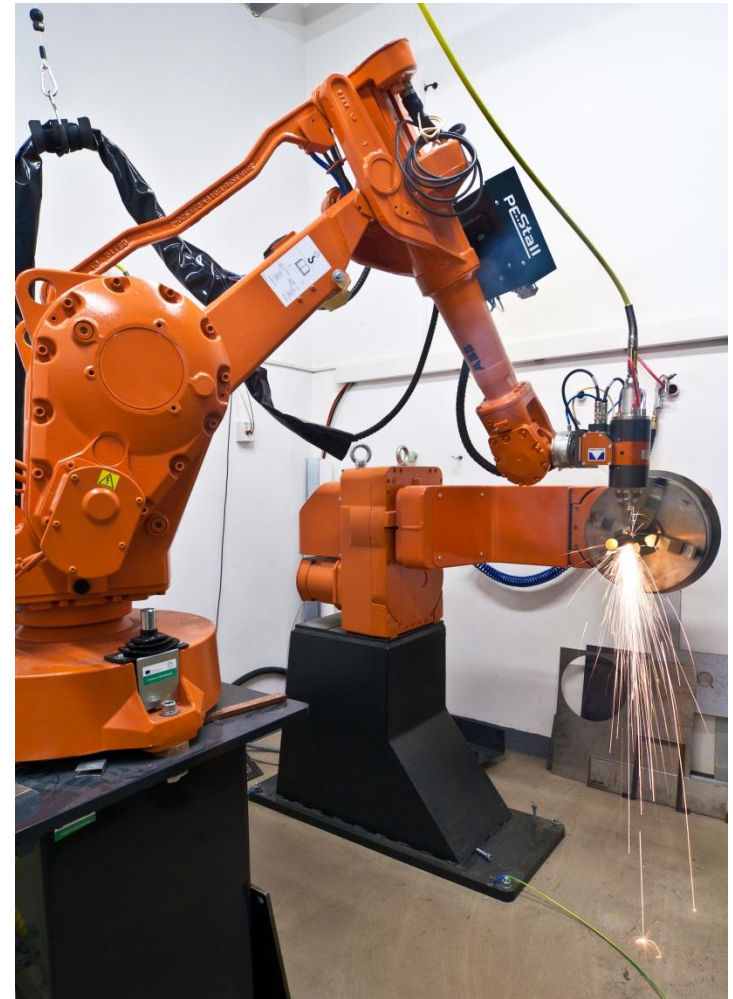
Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

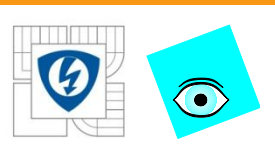
Svařování laserovým svazkem

Výkon – jednotky kilowattů

Ohnisko – stovky mikrometrů

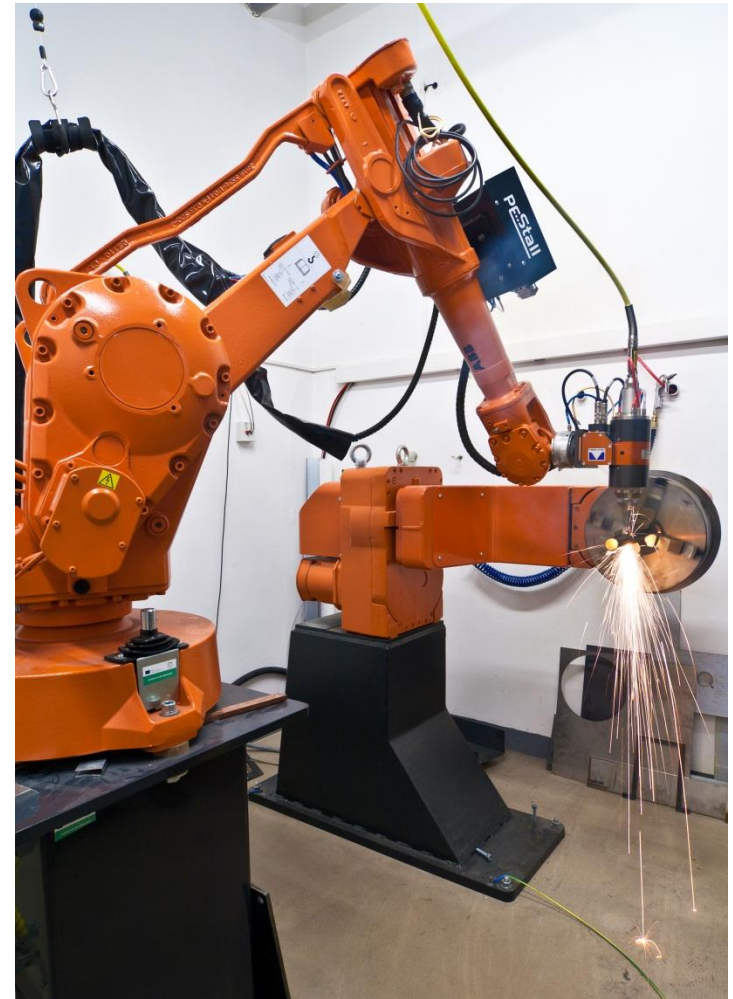
Vlnové délky – 900 nm – 1070 nm





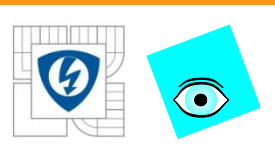
Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Svařování laserovým svazkem



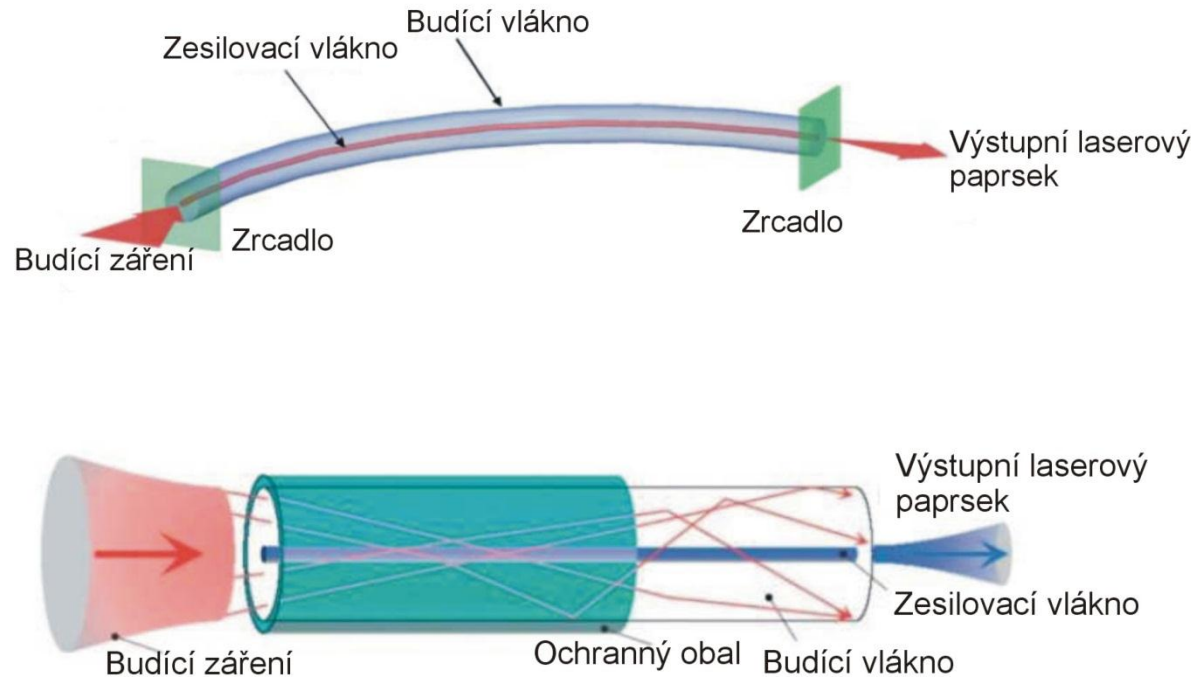
6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



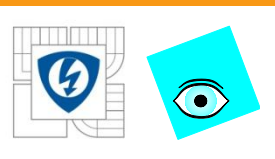
Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Svařování laserovým svazkem



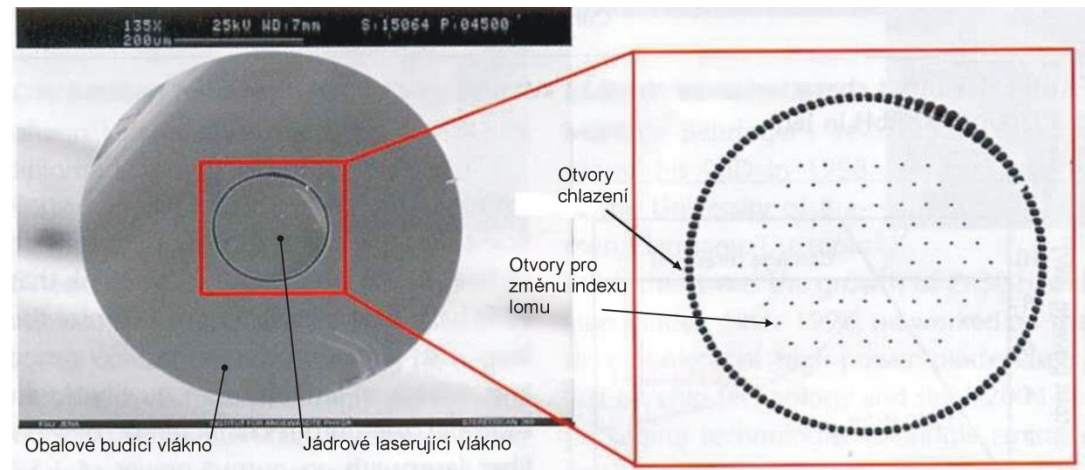
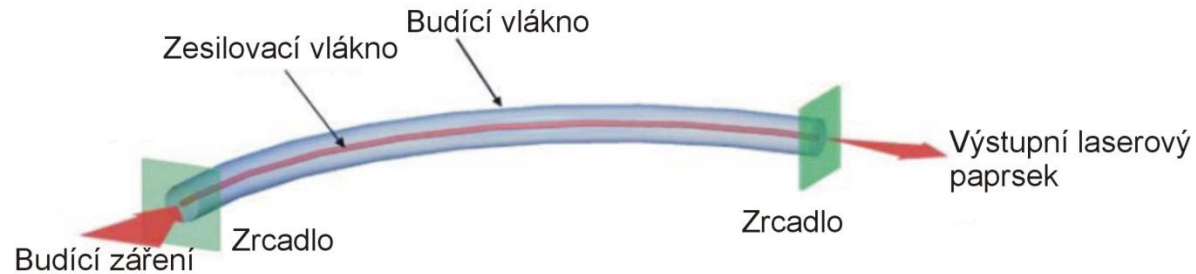
6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



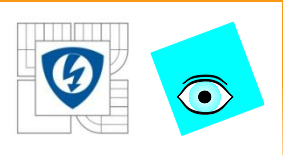
Pole polovodičových laserů, parametry, možnosti aplikací

Svařování laserovým svazkem



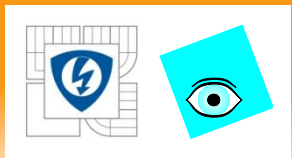
6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



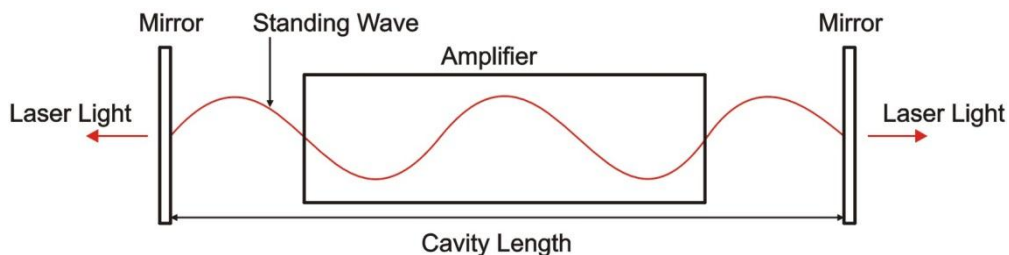
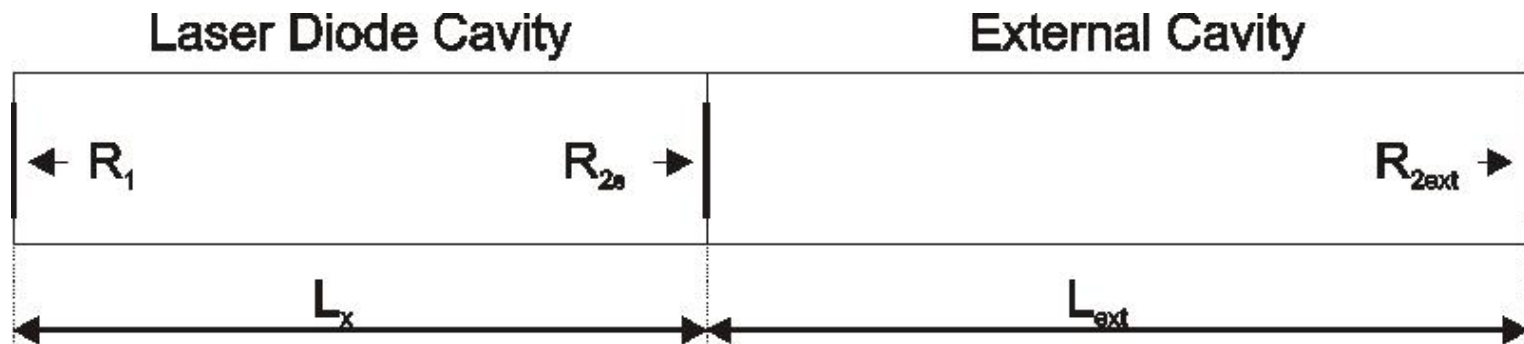
METODY ZVYŠOVÁNÍ KOHERENCE POLOVODIČOVÝCH LASERŮ

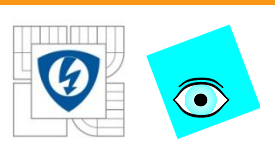
Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)



Metody zvyšování koherence

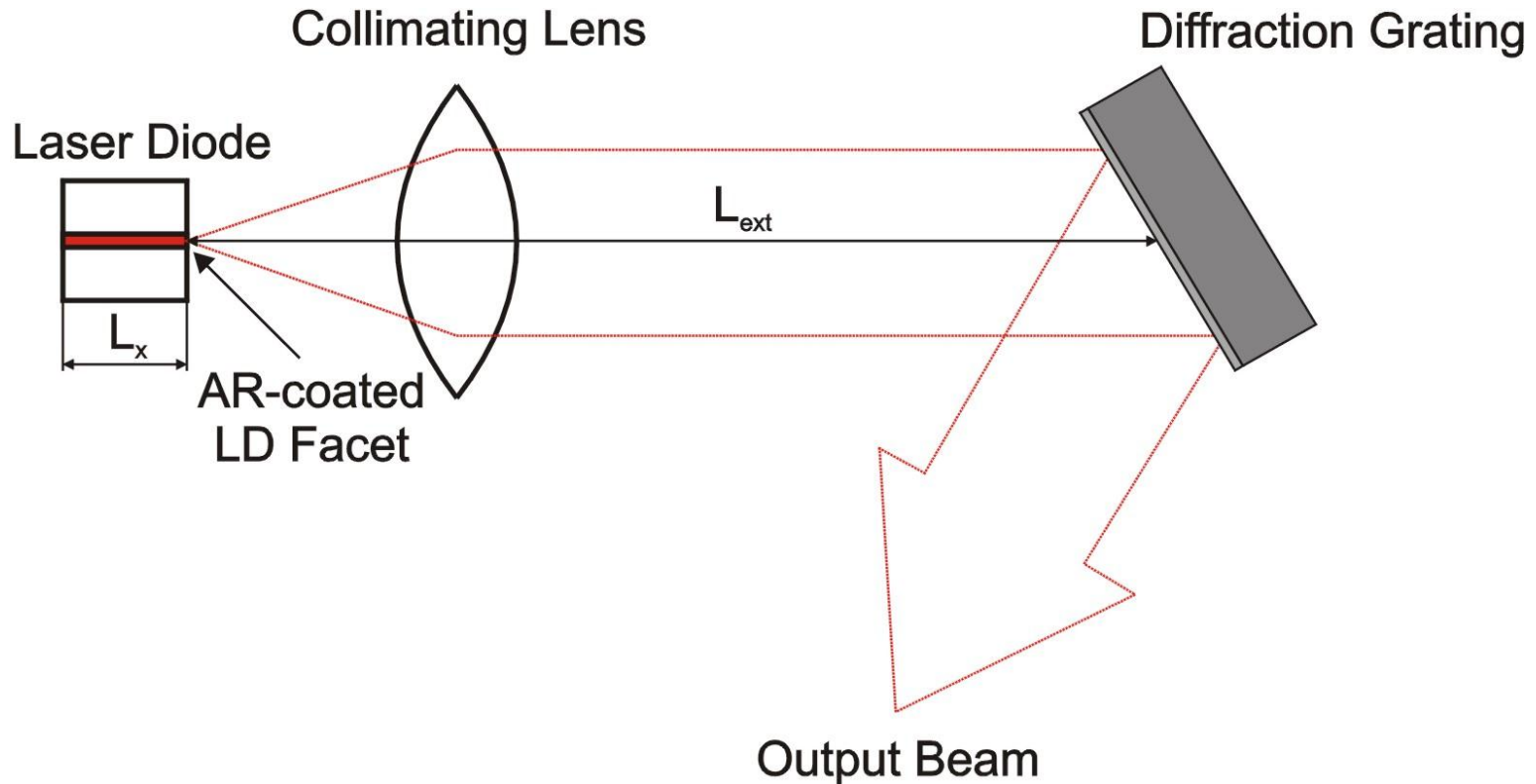
- Polovodičové lasery s externím rezonátorem (ECL)

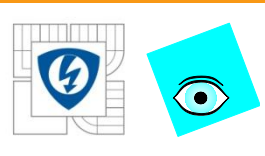




Metody zvyšování koherence

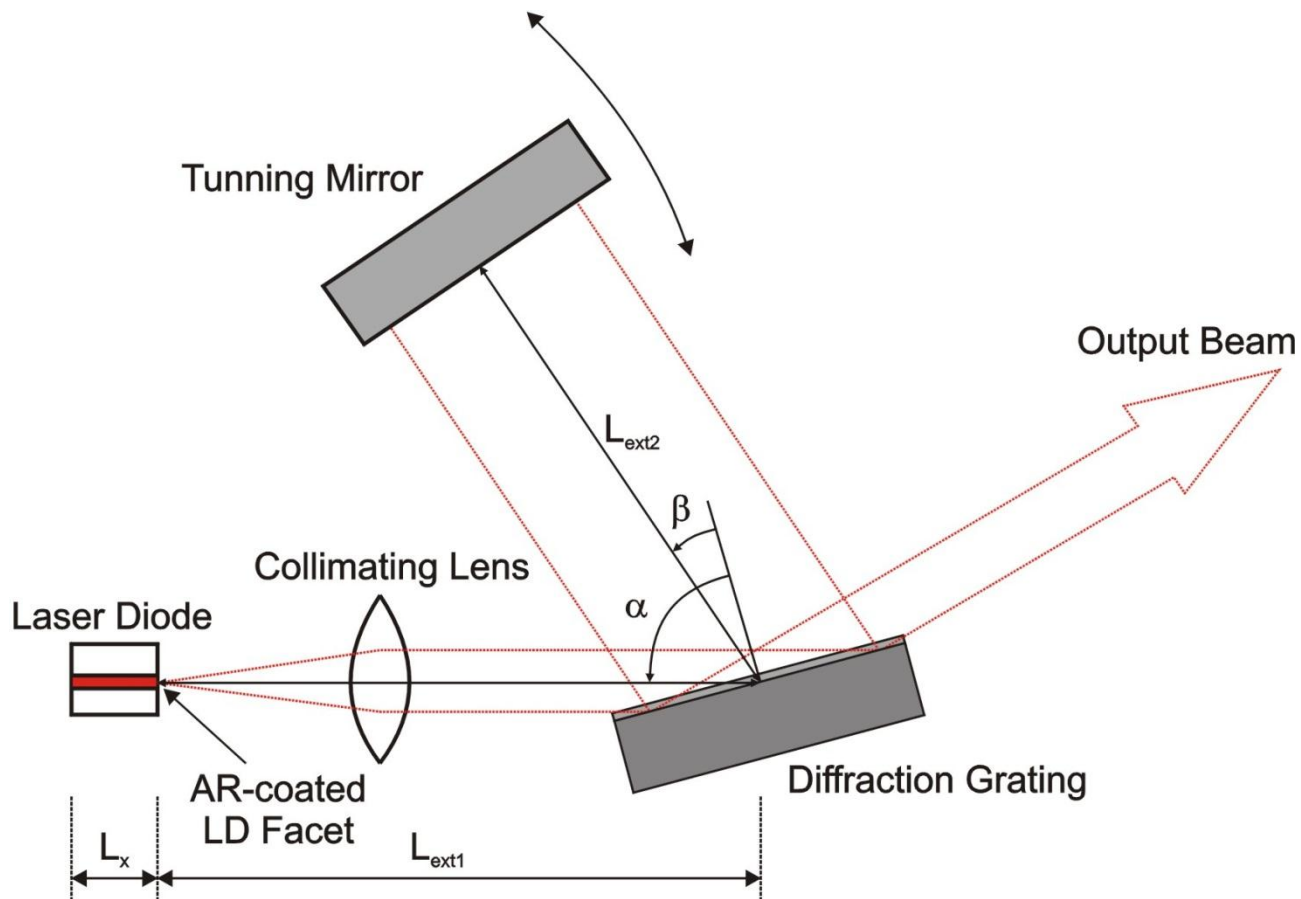
- ECL laser v uspořádání Littrow sestavy

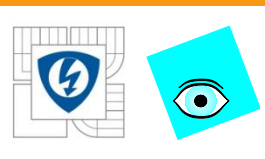




Metody zvyšování koherence

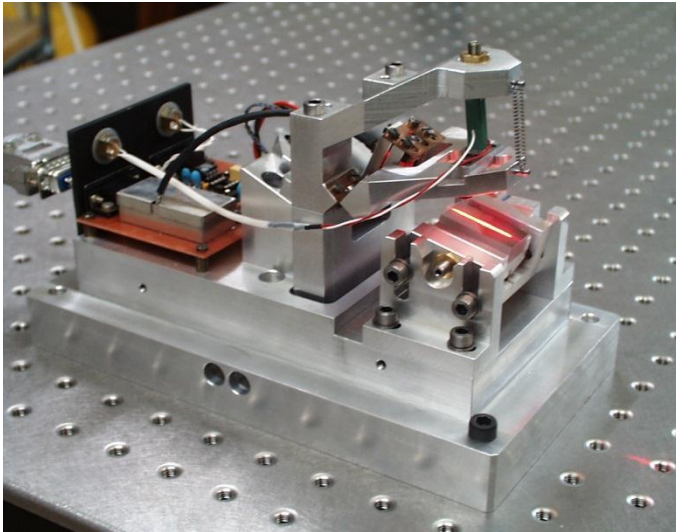
- ECL laser v uspořádání Littmann sestavy



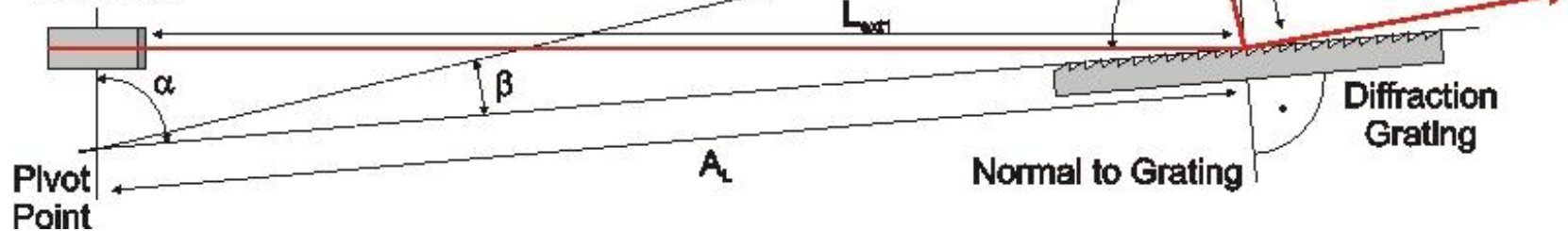


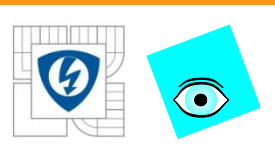
Metody zvyšování koherence

- ECL laser v uspořádání Littmann sestavy



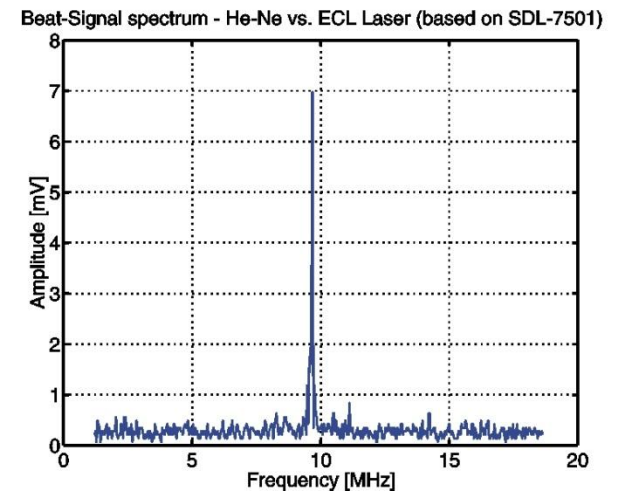
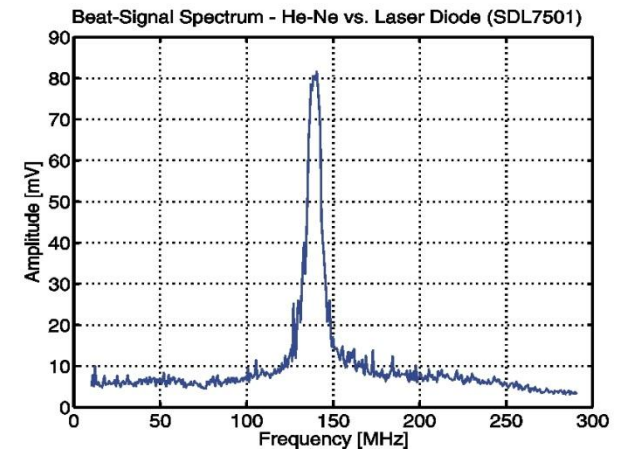
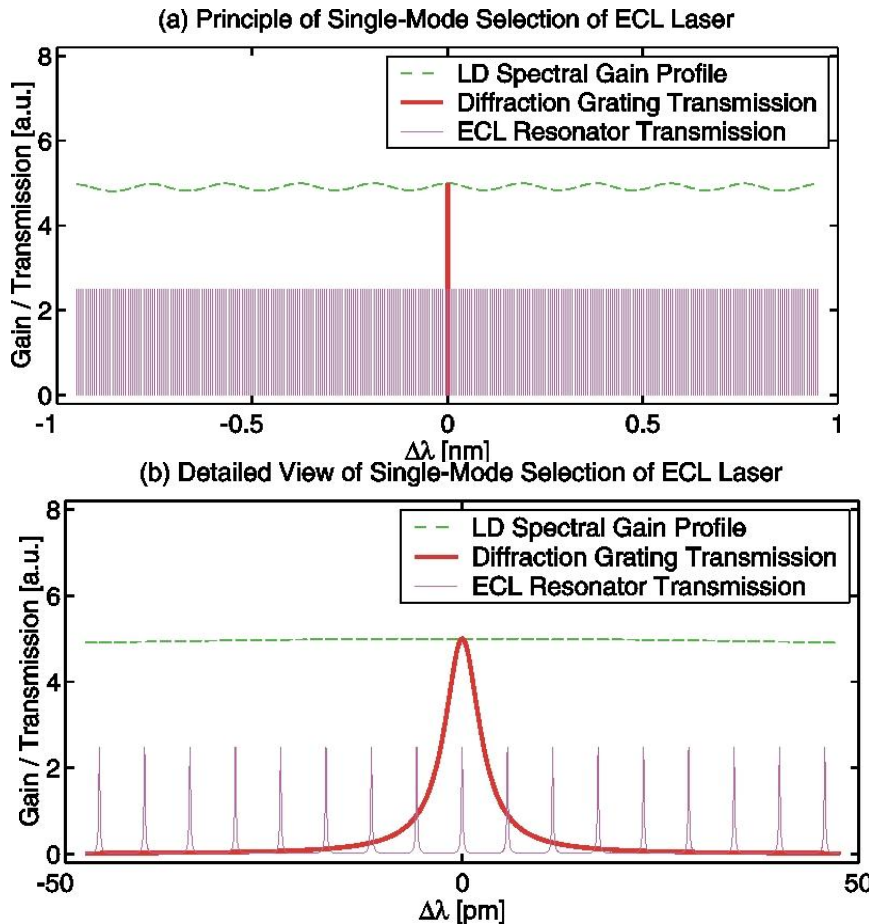
AR-coated
Laser Diode
with Lens

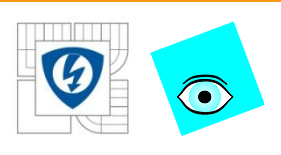




Metody zvyšování koherence

- ECL laser – princip selekce módů

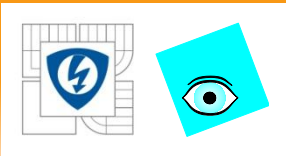




Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

6.12.2012



Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

Výkonové polovodičové lasery

- **Laserové diody a pole laserových diod**

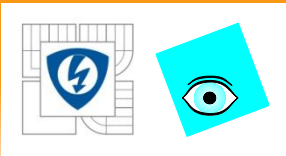
Optický výkon několik stovek W

Šířka emisní čáry několik nm

- **... s vnější zpětnou vazbou**

Optický výkon několik desítek W

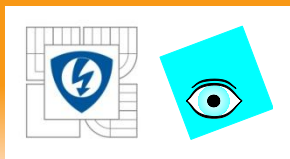
Šířka emisní čáry < 0.2 nm (≈ 100 GHz)



Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

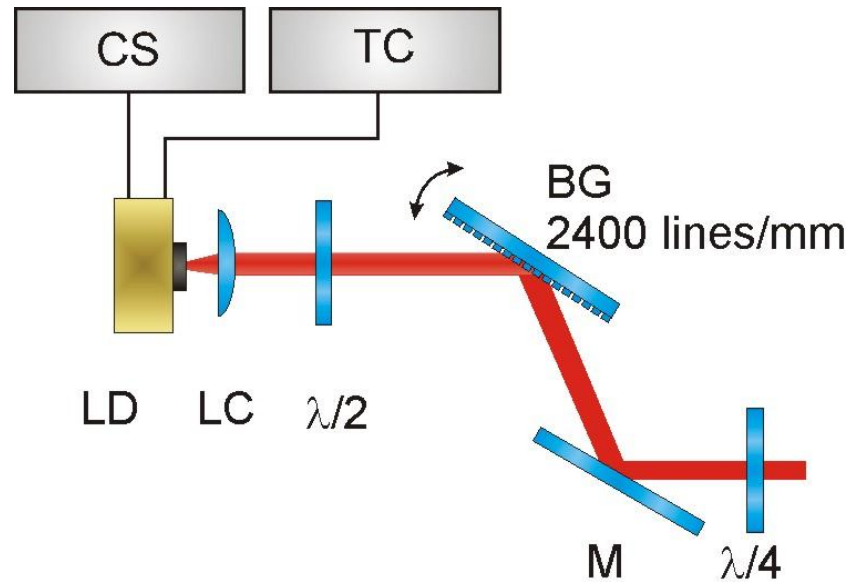
LD s vnější zpětnou vazbou

- zúžení emisní čáry LD
- maximální dosažitelný výstupní výkon laseru
- laditelnost vlnové délky laseru, možnost její stabilizace na absorpční čáru



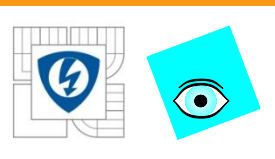
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

Laser s prodlouženým rezonátorem ECL systém

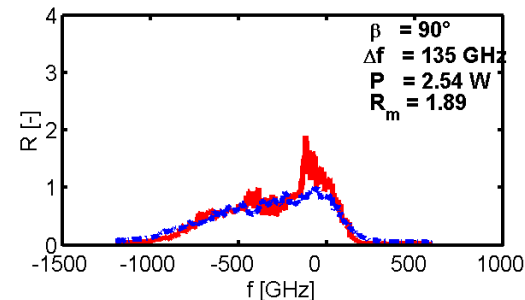
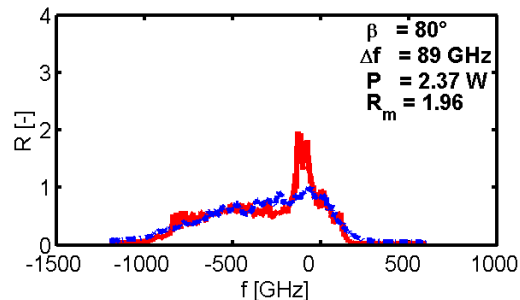
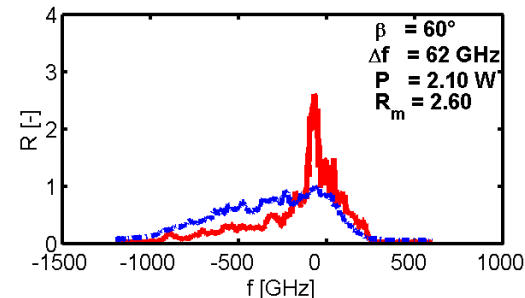
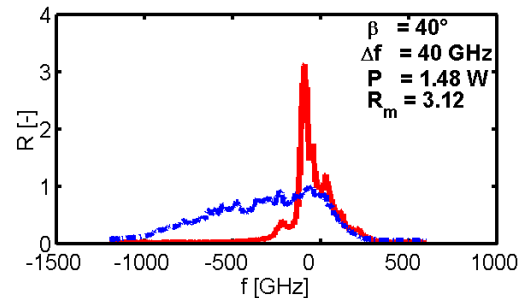
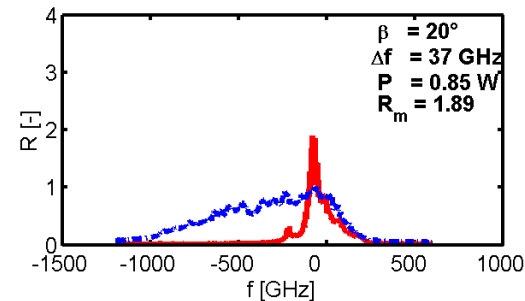
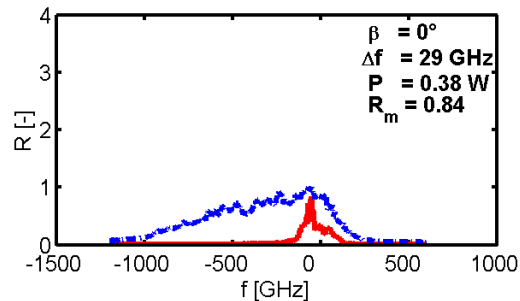


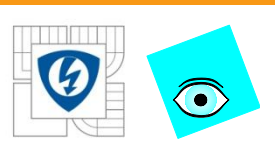
LD - výkonová laserová dioda (S- λ -3000C-200-H, Coherent); **LC** – asférická kolimační čočka; $\lambda/2$ - půlvlnná deska;

BG - difrakční mřížka v Littrowově uspořádání; **M** – zrcadlo; $\lambda/4$ - čtvrtvlnná deska

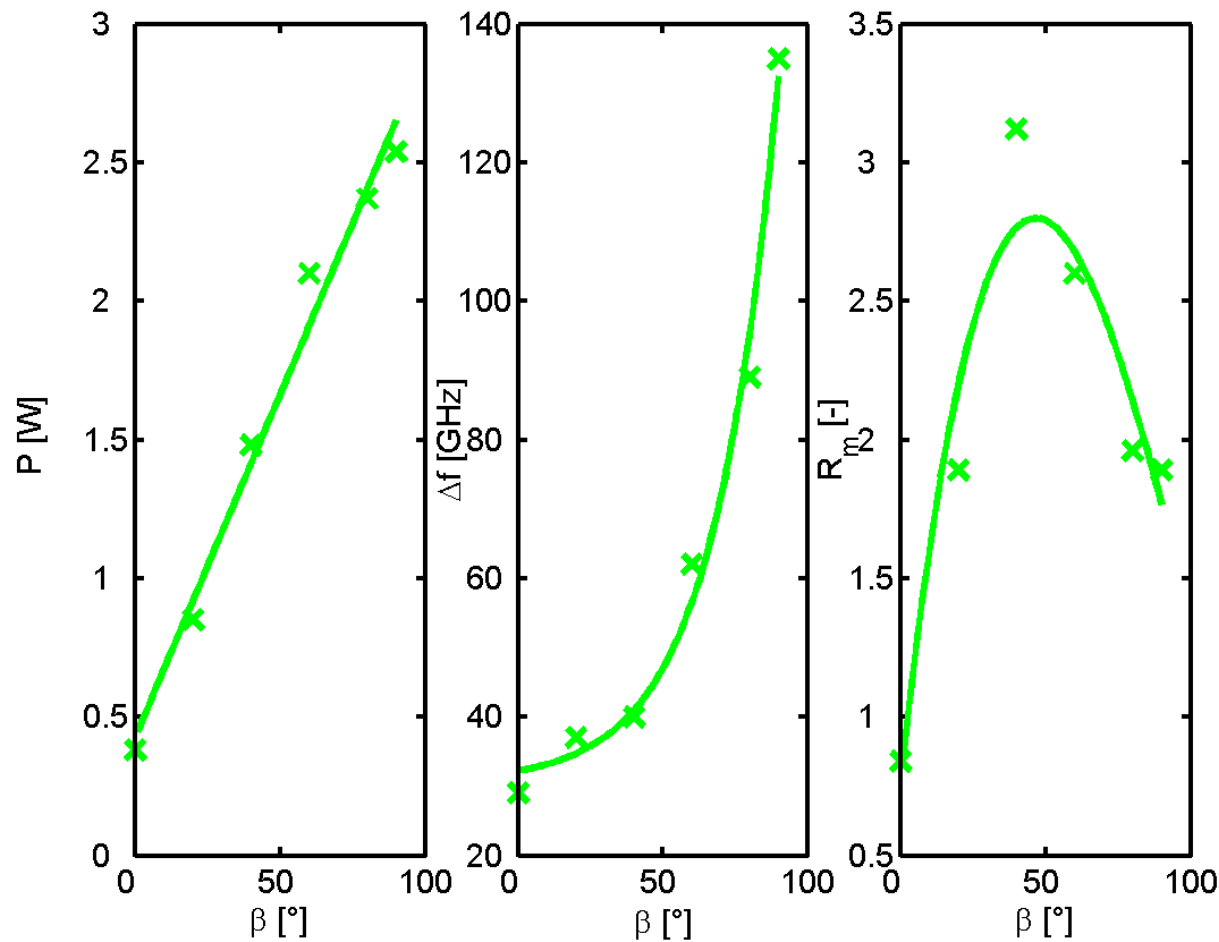


Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod





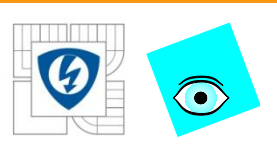
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



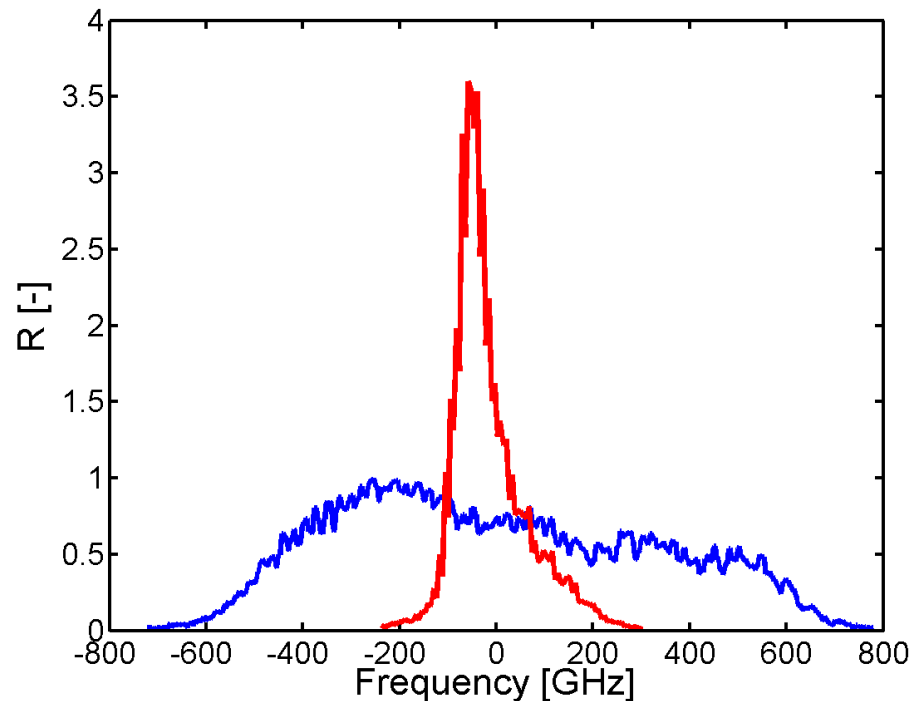
6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



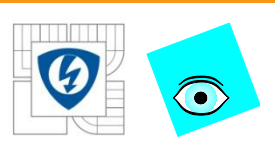


Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

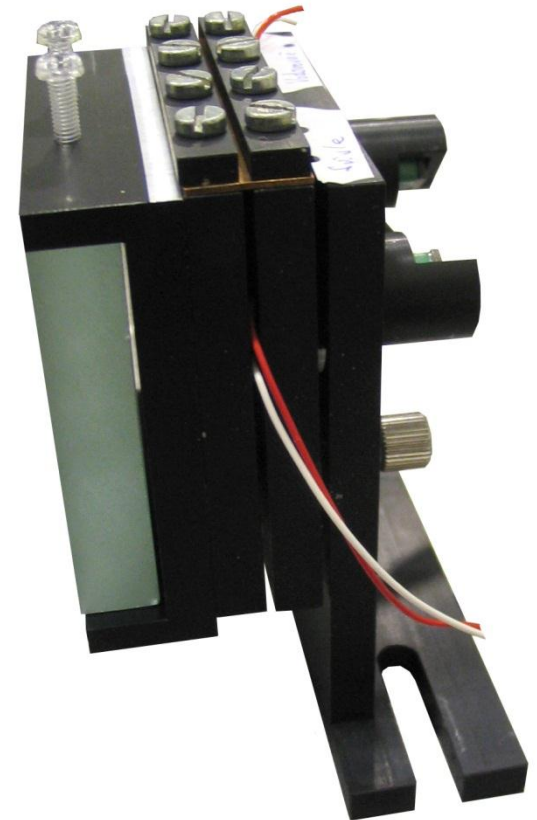
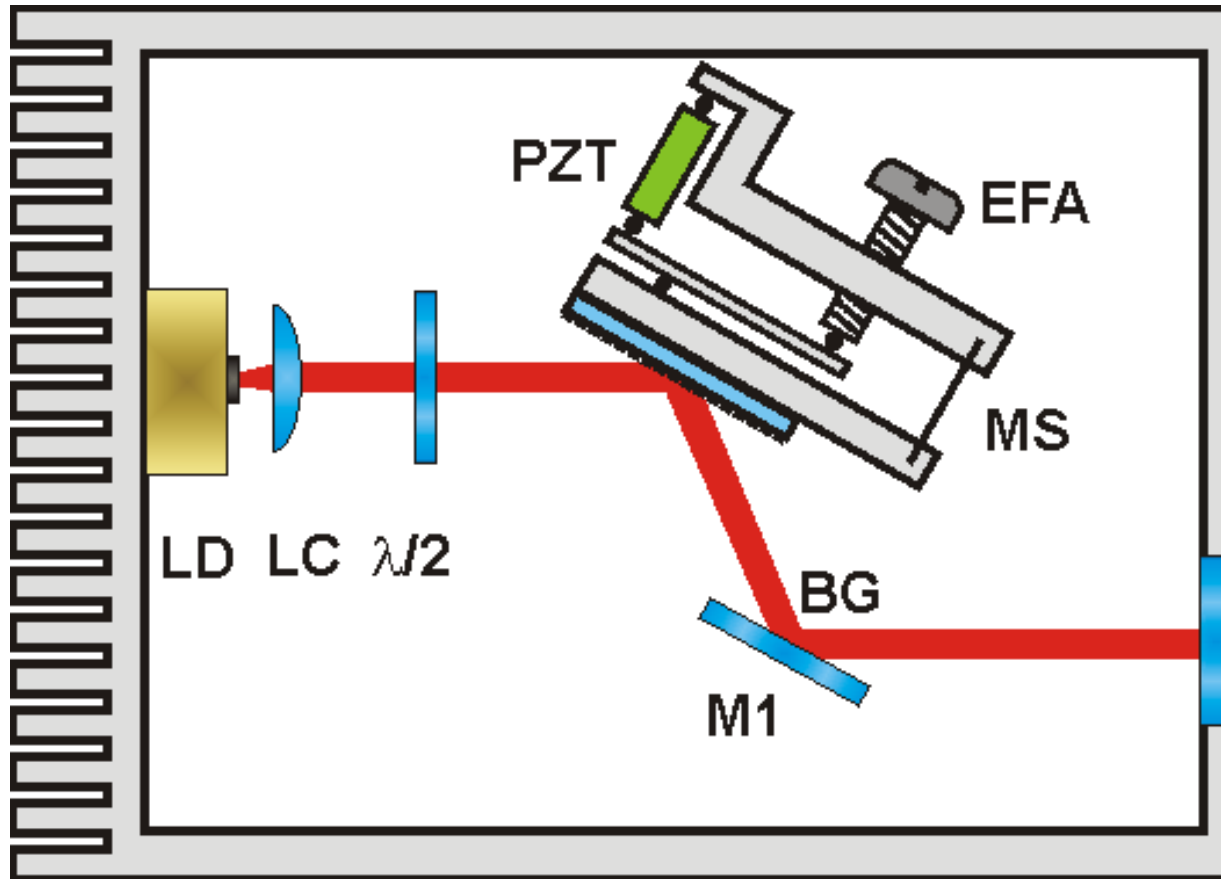


732 GHz (FWHM) @ 3 W

69 GHz (FWHM) @ 1.6 W

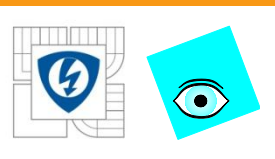


Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

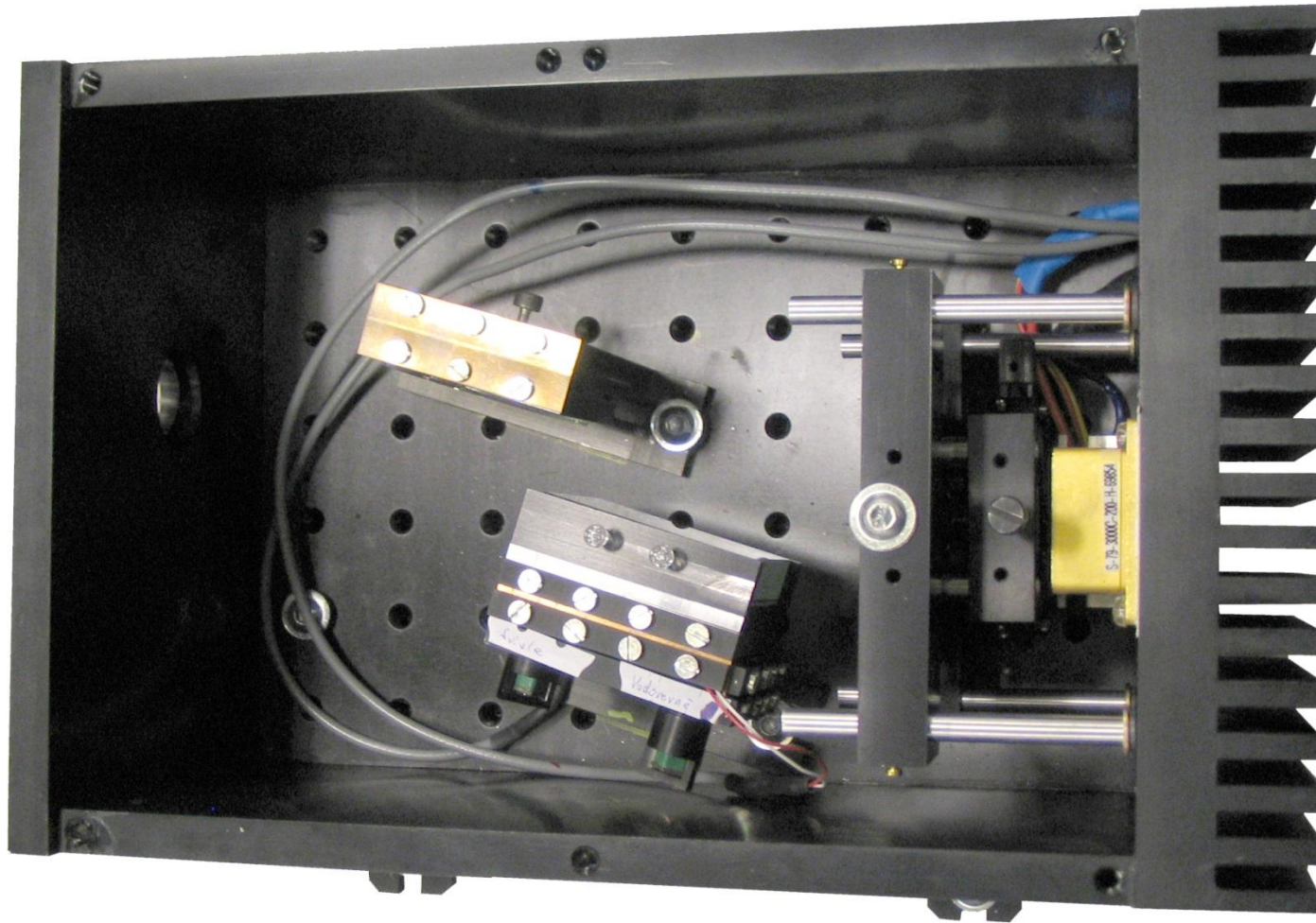


6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



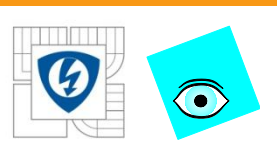
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

Pole laserových diod - parametry

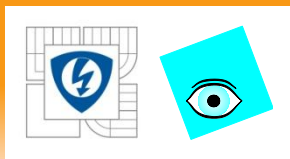


Pole laserových diod B1-79-20.0C-19-30-A (Coherent)

Pole obsahuje 19 emitorů, rozměr emitoru $150\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$, rozteč $500\text{ }\mu\text{m}$

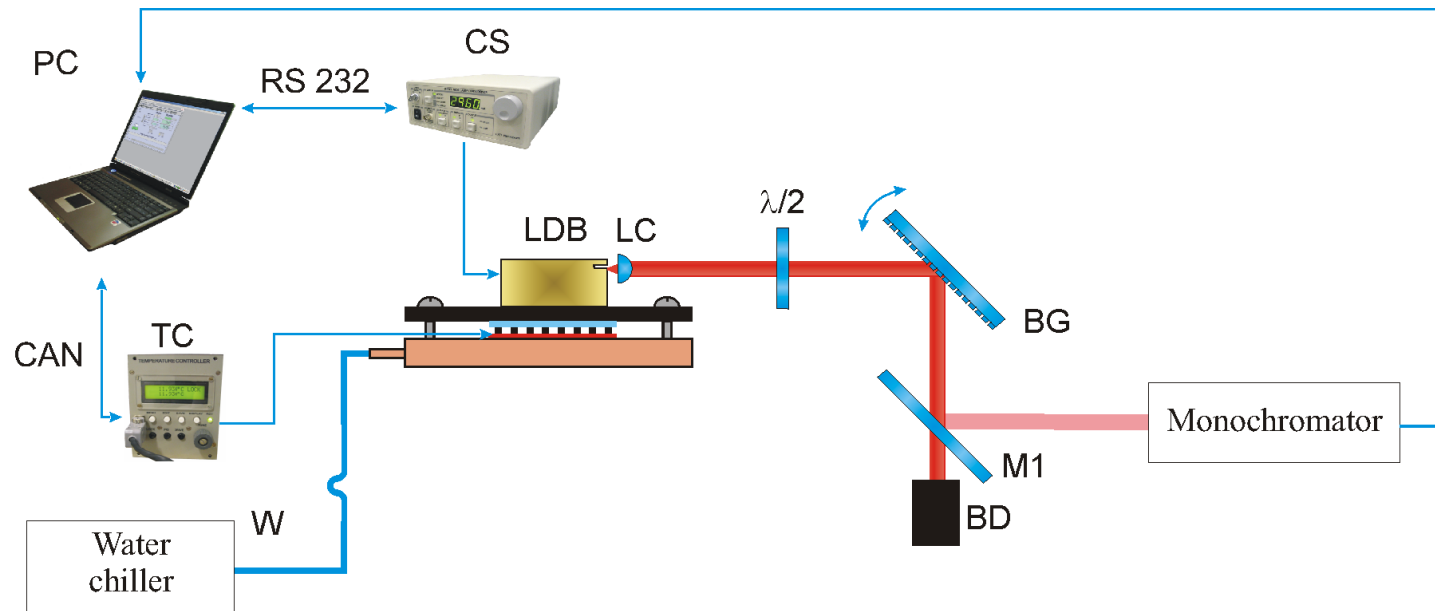
Výstupní optický výkon 21 W

Centrální vlnová délka 795 nm při 25°C



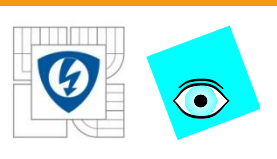
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

Pole laserových diod – zúžení emisního spektra – optická mřížka

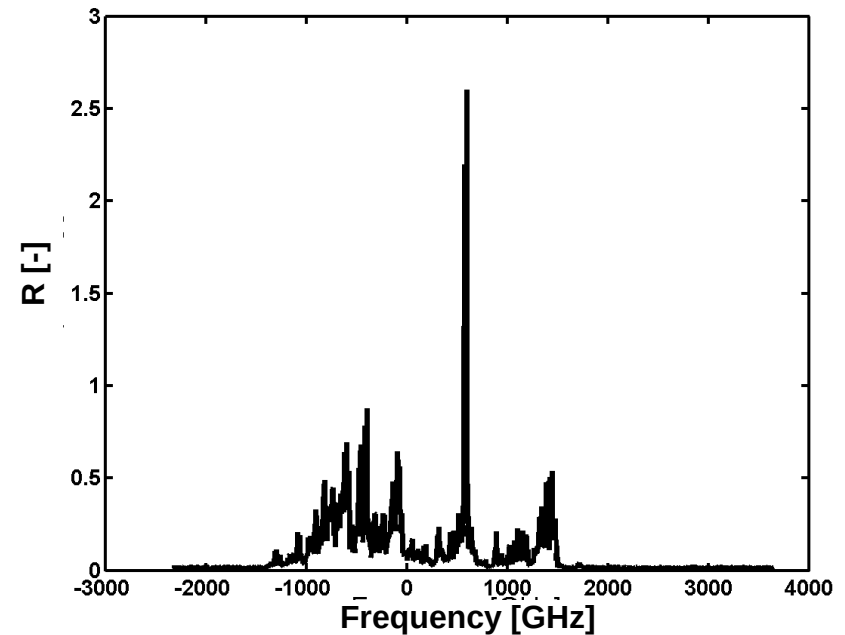
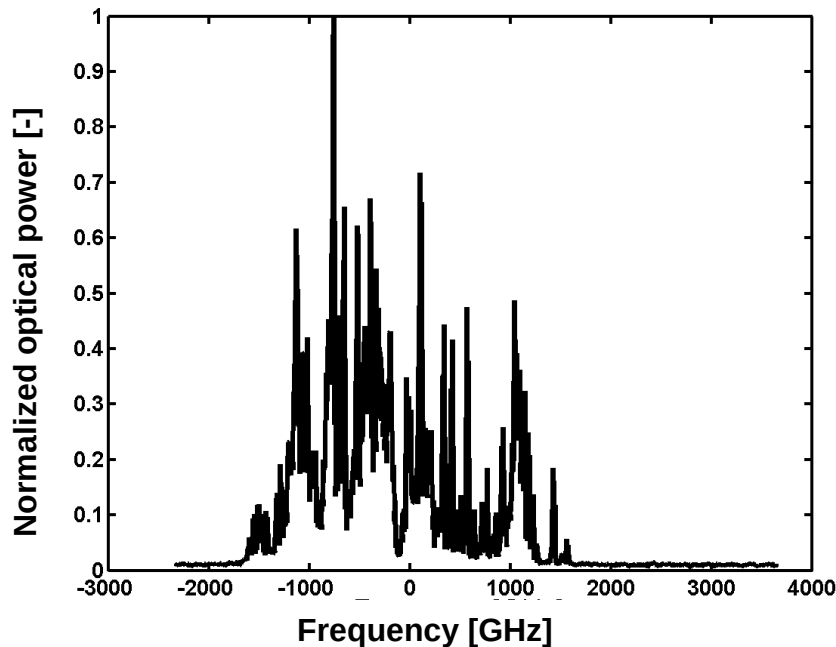


PC - řídicí počítač
CS - zdroj proudu
TC - teplotní kontrolér
LDB - pole LD
LC - kolimační optika

W - blok vodního chlazení
 $\lambda/2$ - půlvlnná deska
BG - difrakční mřížka 1800 lin./mm
M1 - zrcadlo
BD - pohlcovač svazku



Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



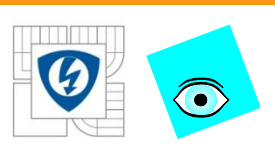
Emisní spektrum pole LD před (vlevo) a po (vpravo) zúžení.

Měřeno při $I = 13$ A a $T = 24^\circ\text{C}$.

Výstupní výkon ... 3 W $\rightarrow$ 0,56 W (18%)

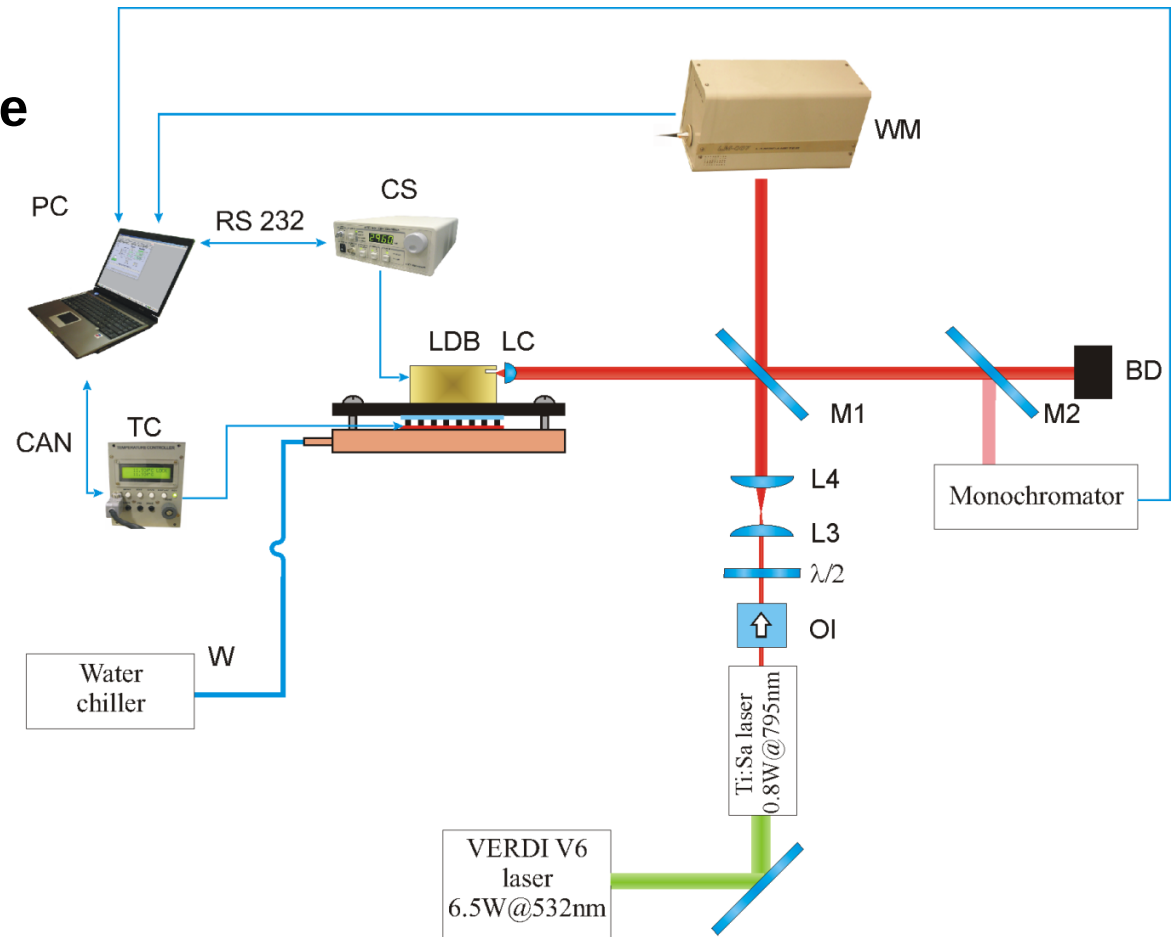
FWHM ... 830 GHz $\rightarrow$ 24 GHz

$R_m = 2,6$



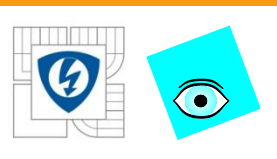
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

Zúžení emisní čáry – injection locking technique

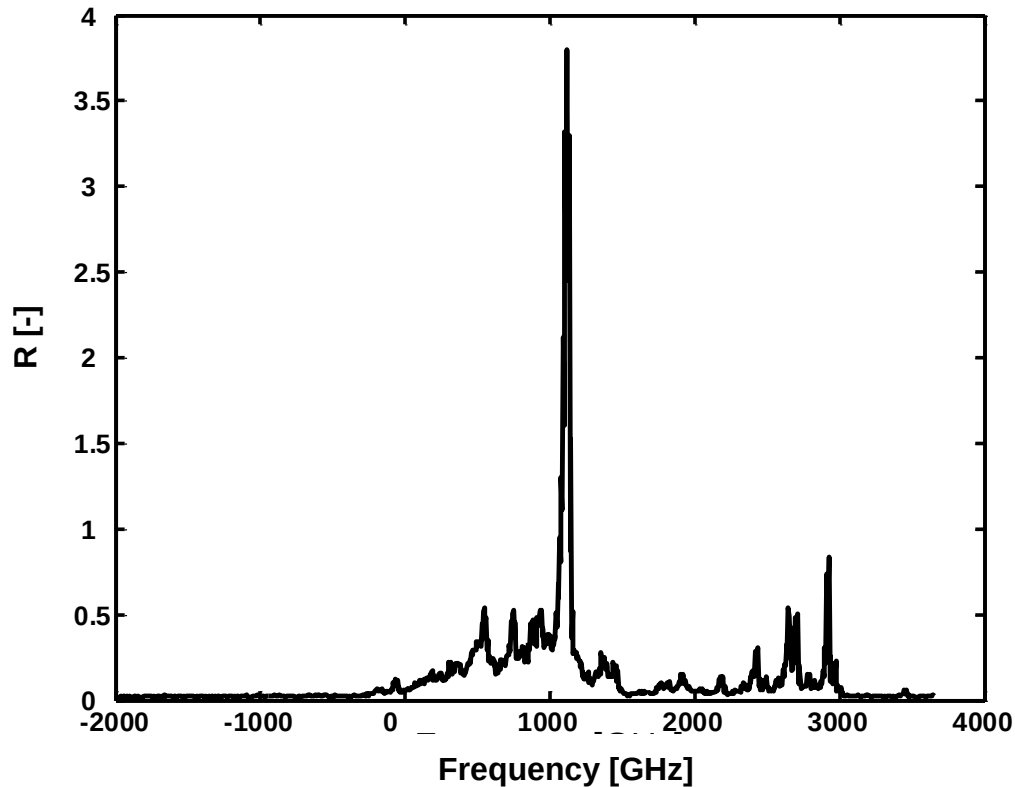


M1 - zrcadlo (59% odraz)

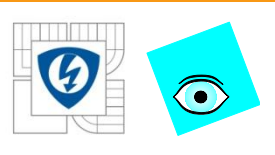
OI - optický izolátor



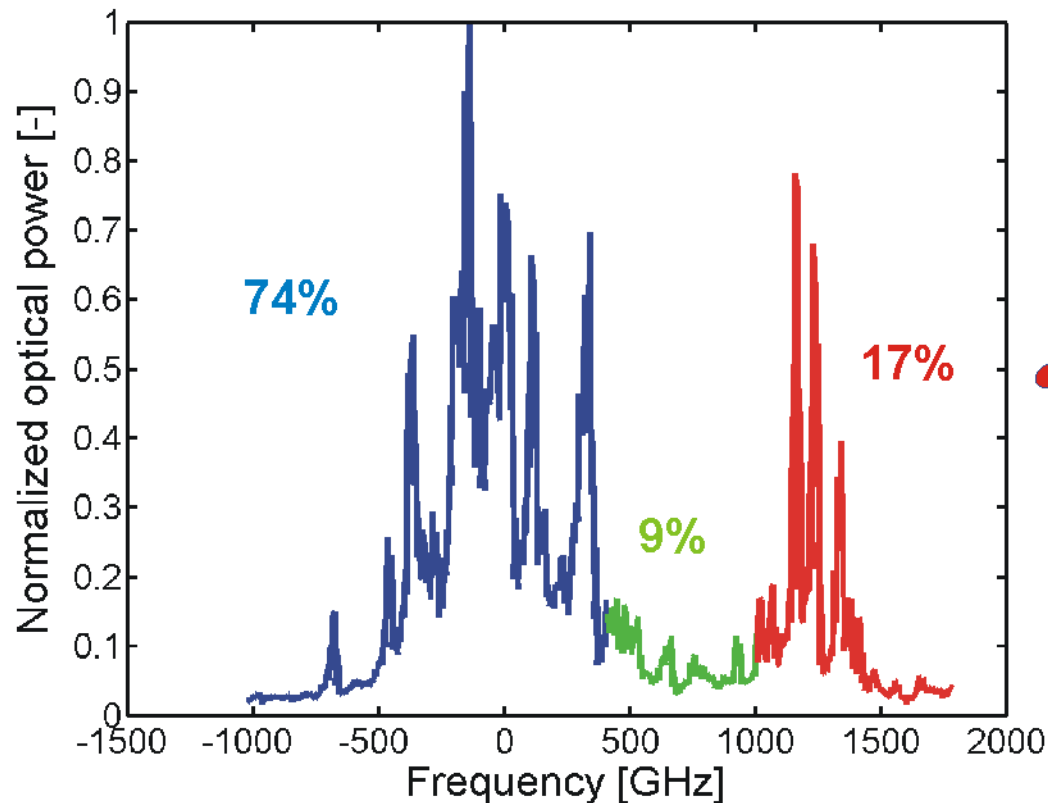
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



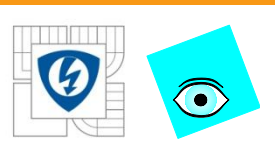
Emisní spektrum pole LD po zúžení. Měřeno při $I = 13 \text{ A}$ a $T = 24^\circ\text{C}$.
Výstupní výkon ... ztráta $\approx$ odrazivost M1 (59%)
FWHM ... 830 GHz $\rightarrow$ 39 GHz $R_m = 3,8$



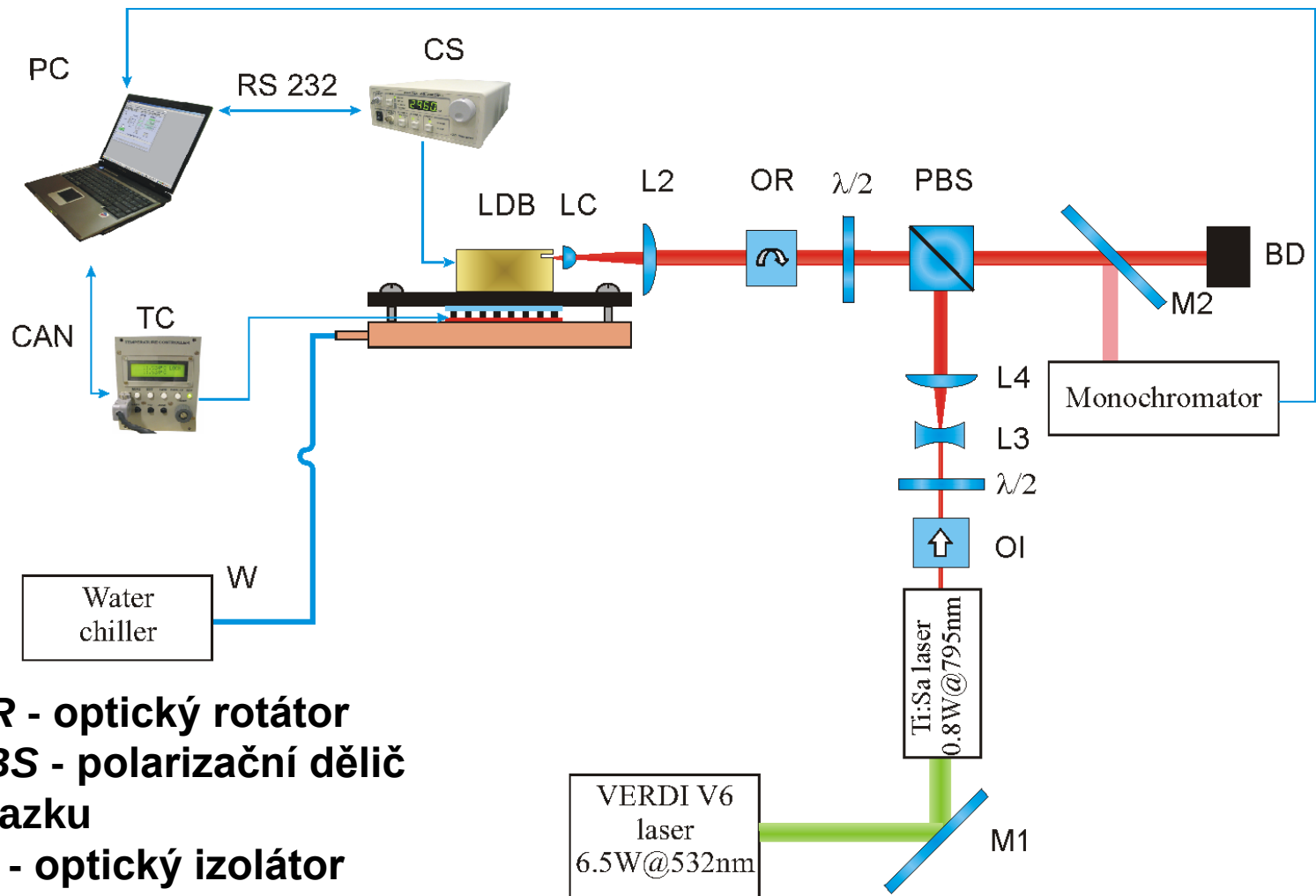
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



Emisní spektrum pole LD, měřeno při $I = 11$ A a $T = 23,4^\circ\text{C}$.



Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

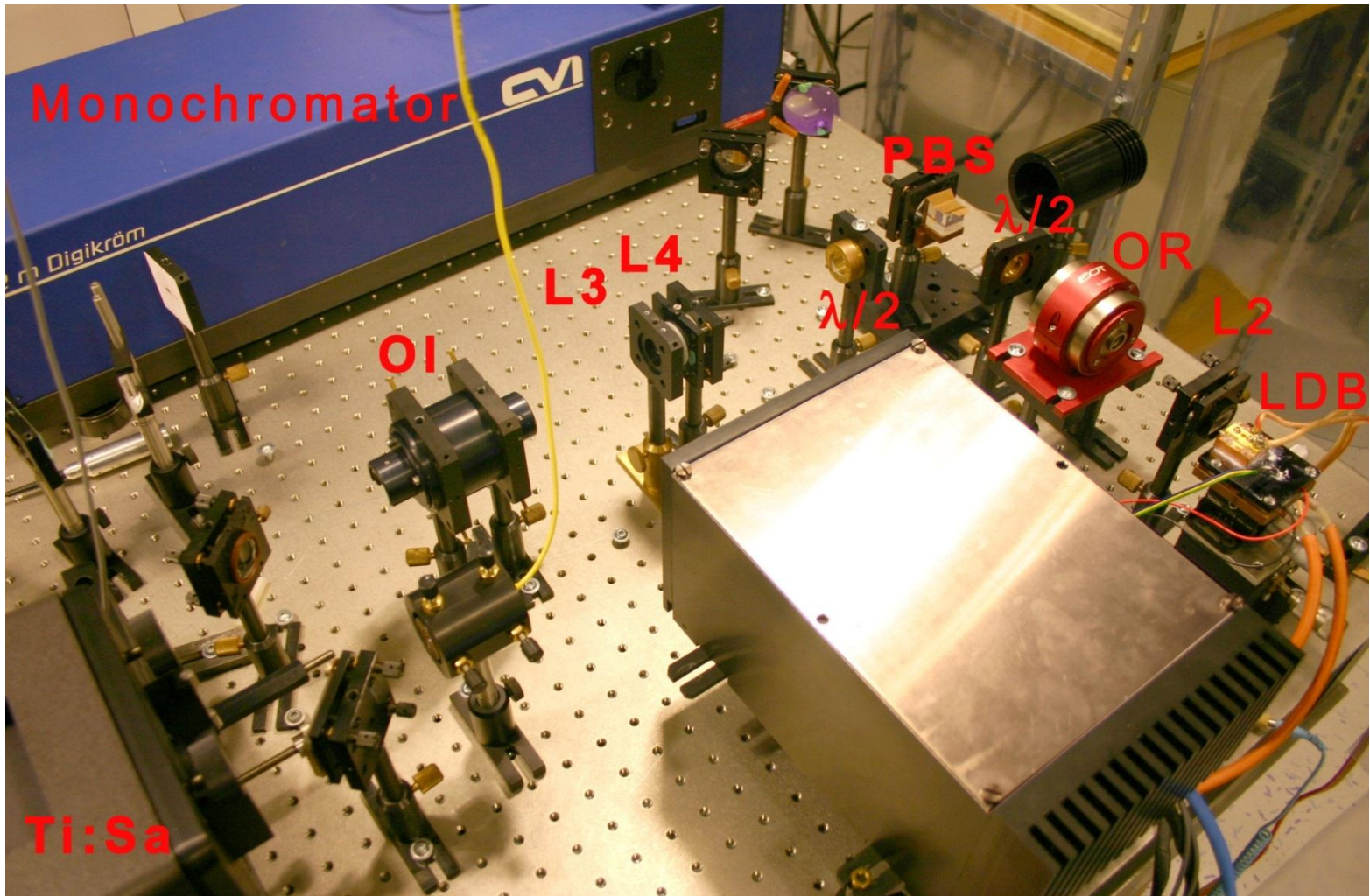


OR - optický rotátor
PBS - polarizační dělič
svazku
OI - optický izolátor

6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

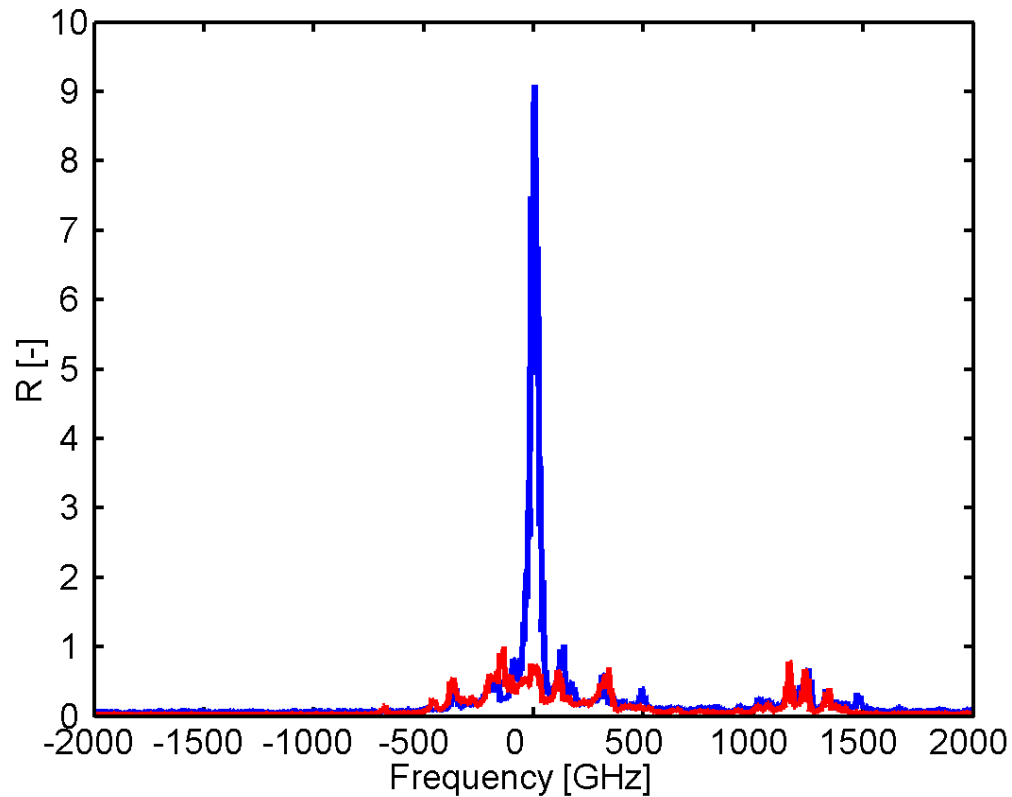
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



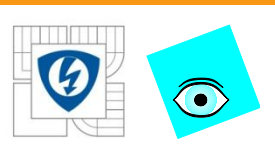
Měřeno při $I = 11$ A a $T = 23,4^{\circ}\text{C}$.

Výstupní výkon ... ztráta $\approx 10\%$

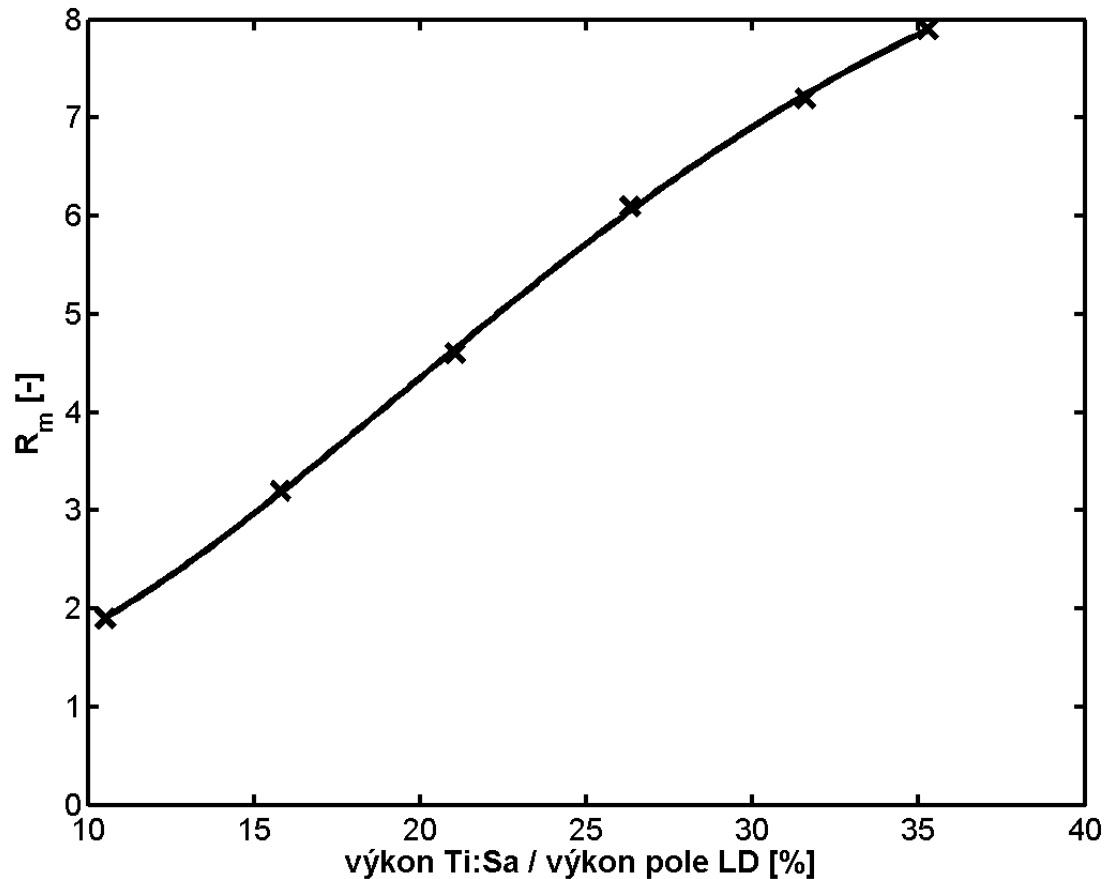
FWHM ... 830 GHz $\rightarrow$ 35 GHz

Výkon Ti:Sa svazku ... 600 mW

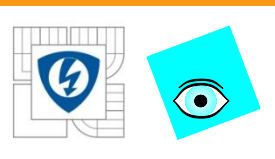
$R_m = 9,1$



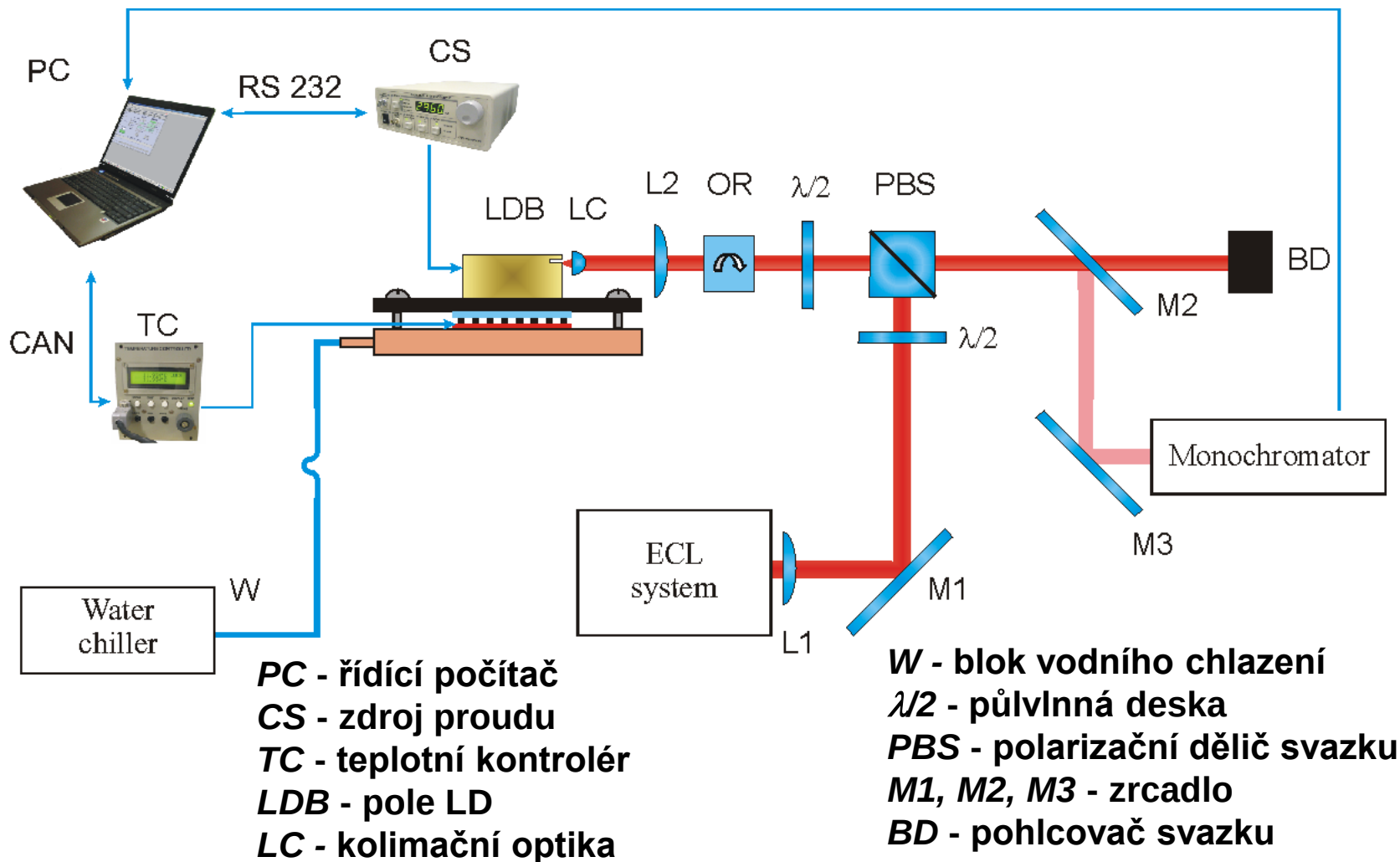
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

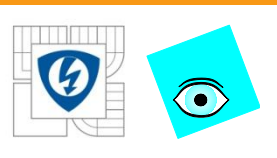


Měřeno při $I = 11$ A a $T = 23,4^\circ\text{C}$.

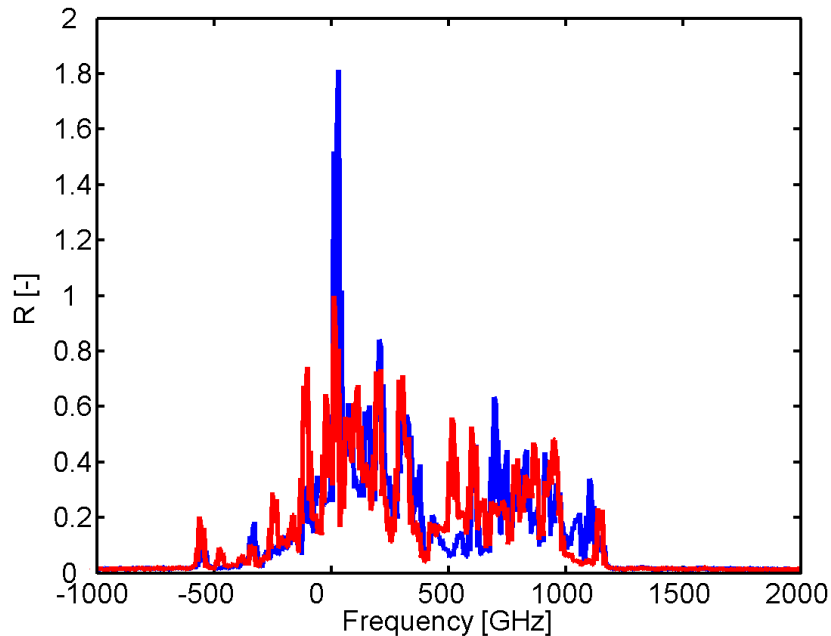


Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

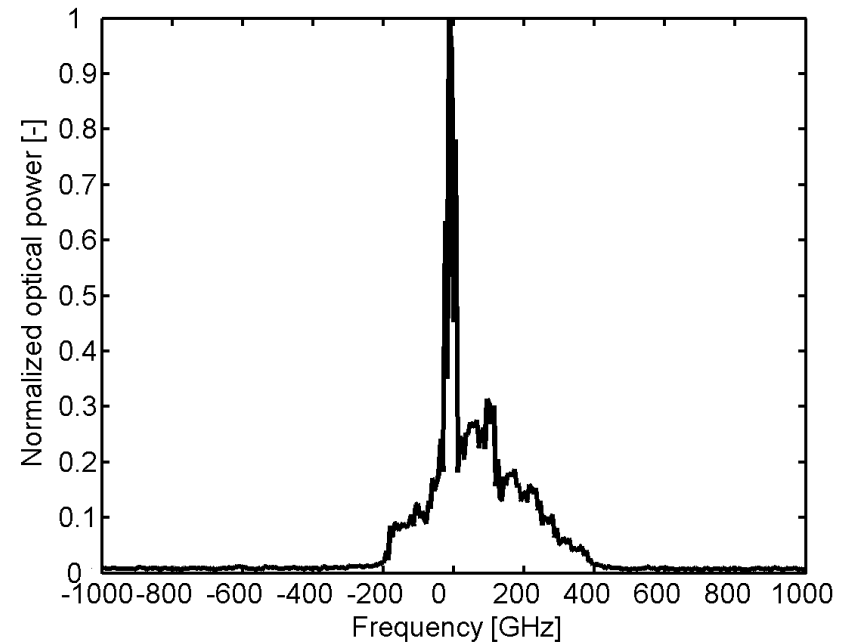




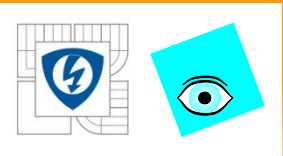
Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod



Měřeno při $I = 11$ A a $T = 23,4^{\circ}\text{C}$.
Výstupní výkon ... ztráta $\approx 10\%$
FWHM ... 830 GHz $\rightarrow$ 35 GHz
 $R_m = 1,8$

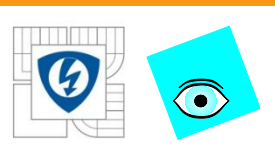


Výkon ECL svazku ... 1.5 W
ECL FWHM ... 40 GHz / 300 GHz (90%)



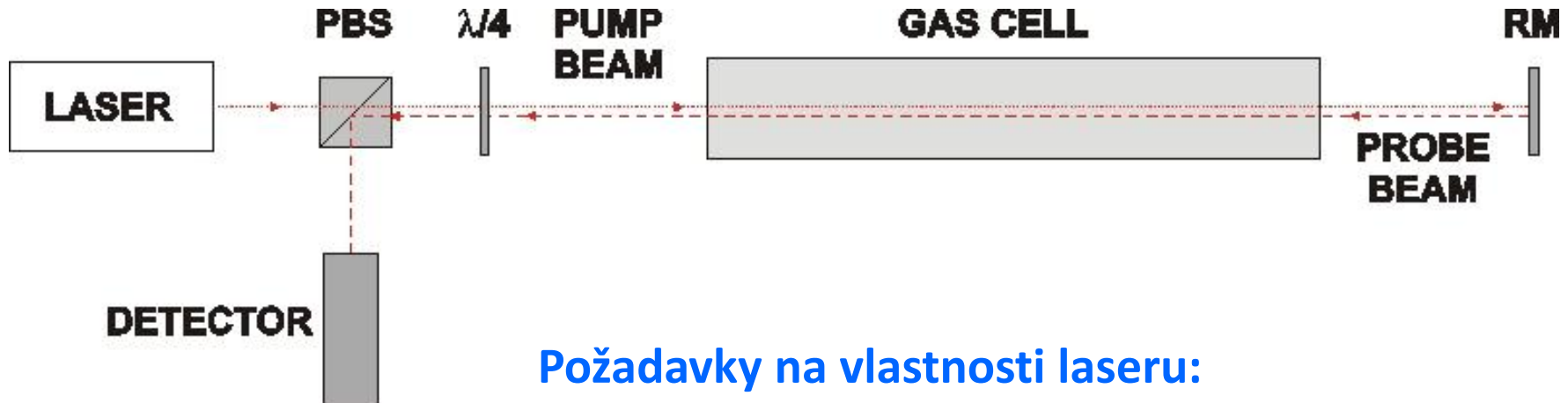
Spektroskopie s přeladitelnými laserovými diodami

Ing. Ondřej Číp, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)



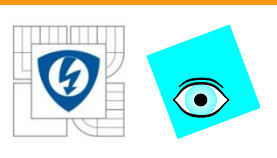
Spektroskopie s laserovými diodami

- Princip laserové saturační spektroskopie



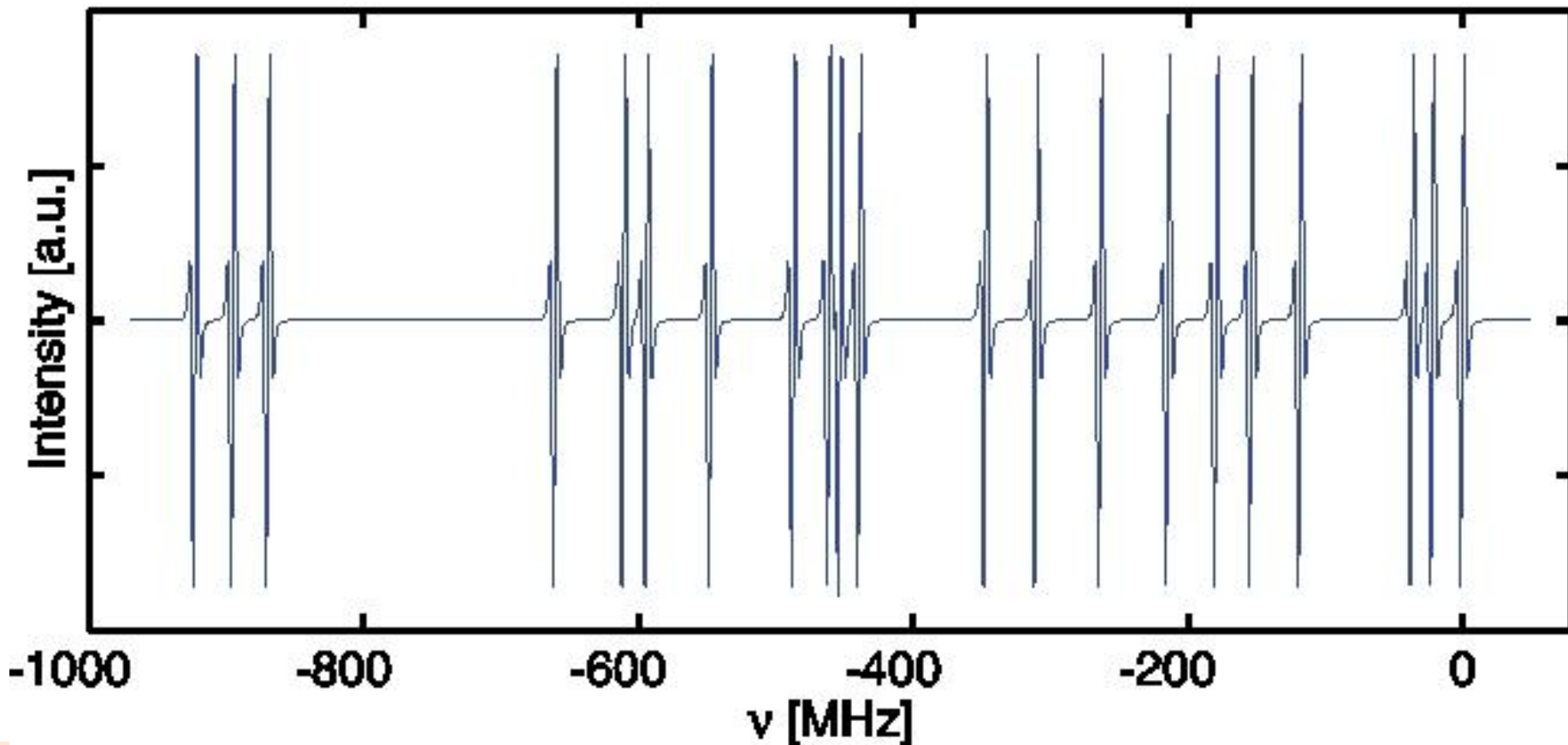
Požadavky na vlastnosti laseru:

- Single-mode operation
- Linewidth < 1MHz
- Tuning range above 1GHz
- Simple wavelength or frequency modulation



Spektroskopie s laserovými diodami

- Spektroskopie v molekulárním jódu P(33)6-3 at 633 nm
(c) Theoretical model of the P(33)6-5 transition



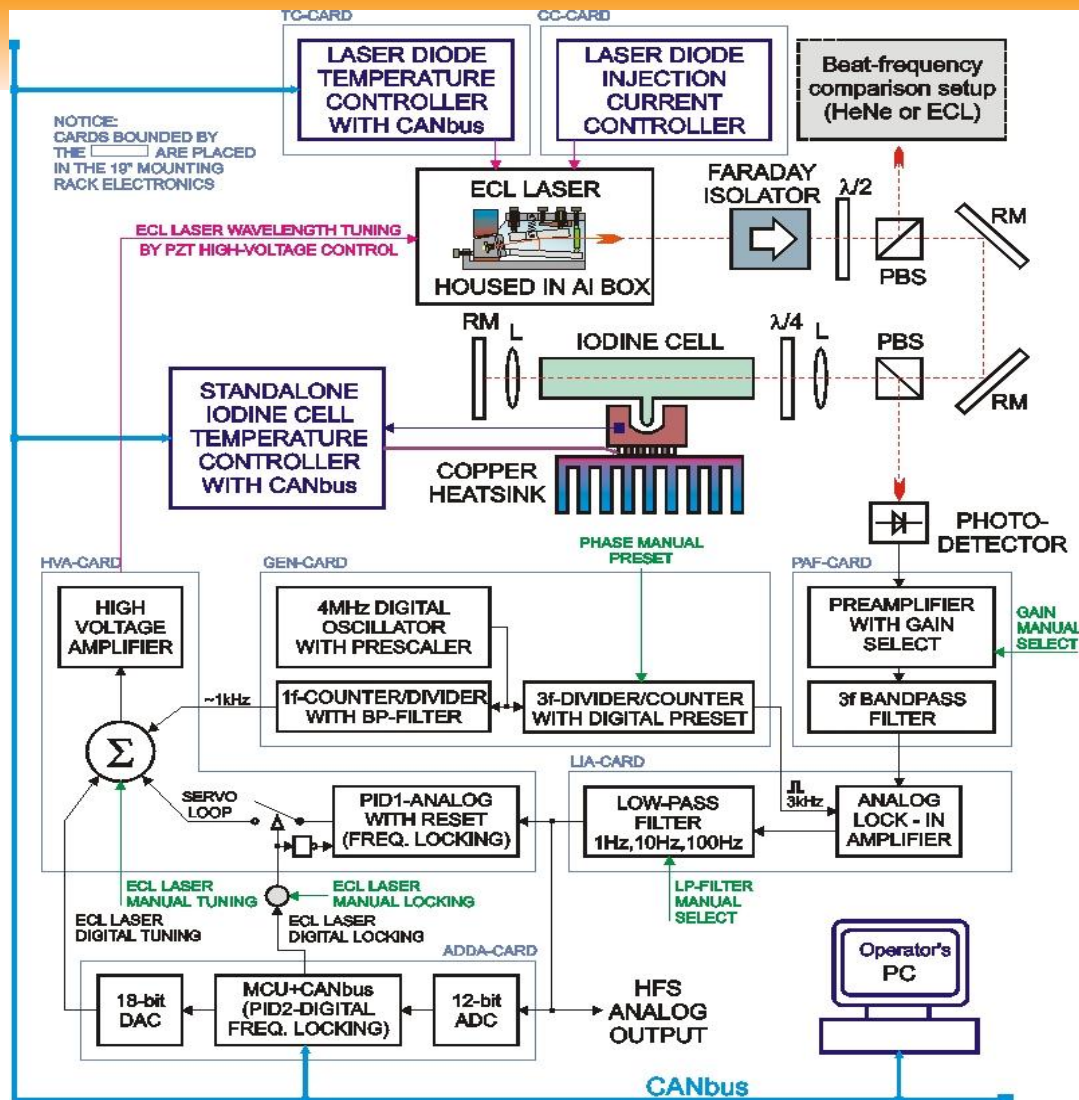
6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

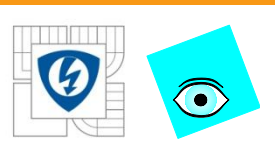


Spektroskopie s laserovými diodami

Celková
sestava pro
stabilizaci
ECL laseru
na
molekulární
přechody v
parách jodu



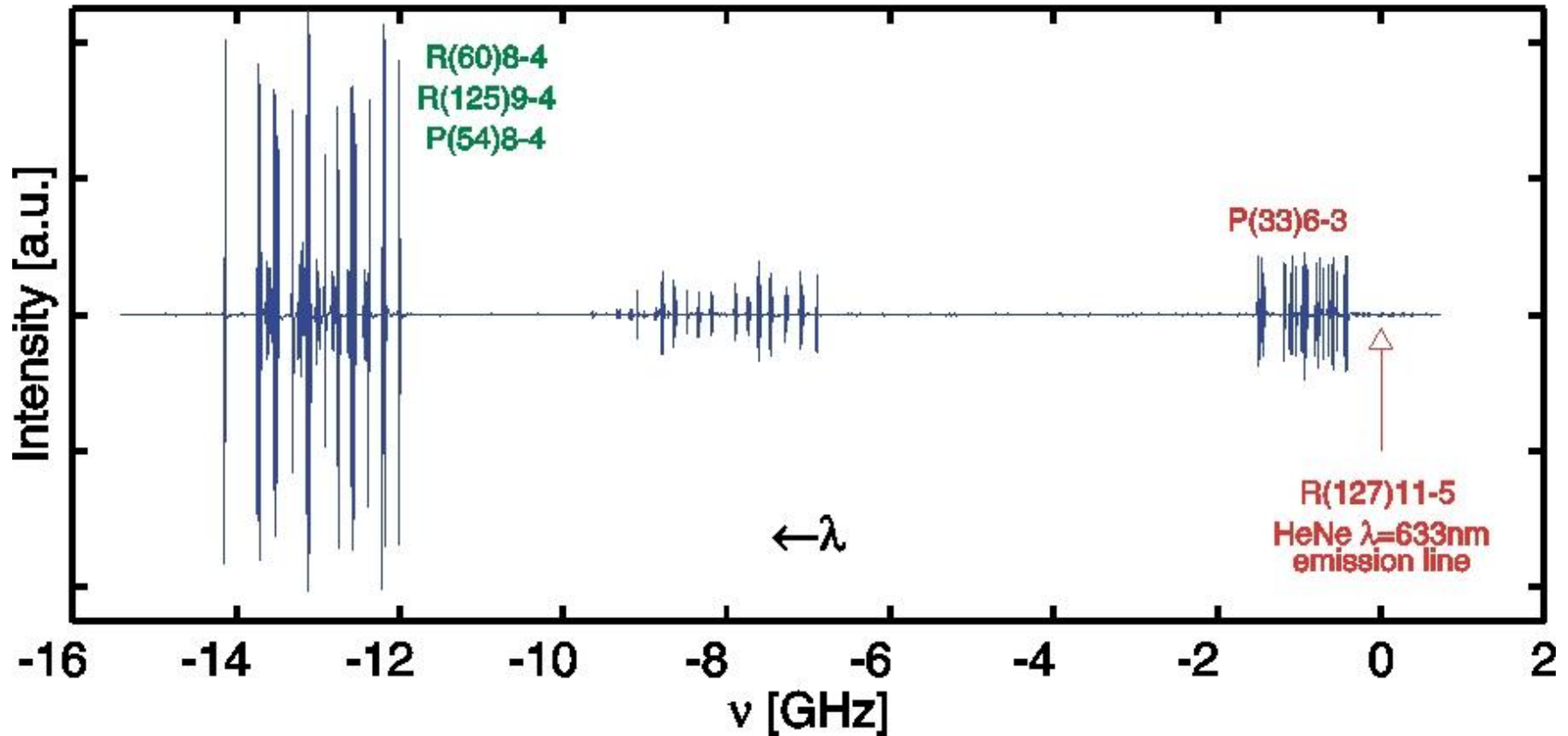
6.12.2012

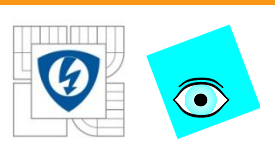


Spektroskopie s laserovými diodami

- Spektroskopie v molekulárním jódu P(33)6-3 at 633 nm

(a) Third-harmonic spectra scan of the molecular iodine



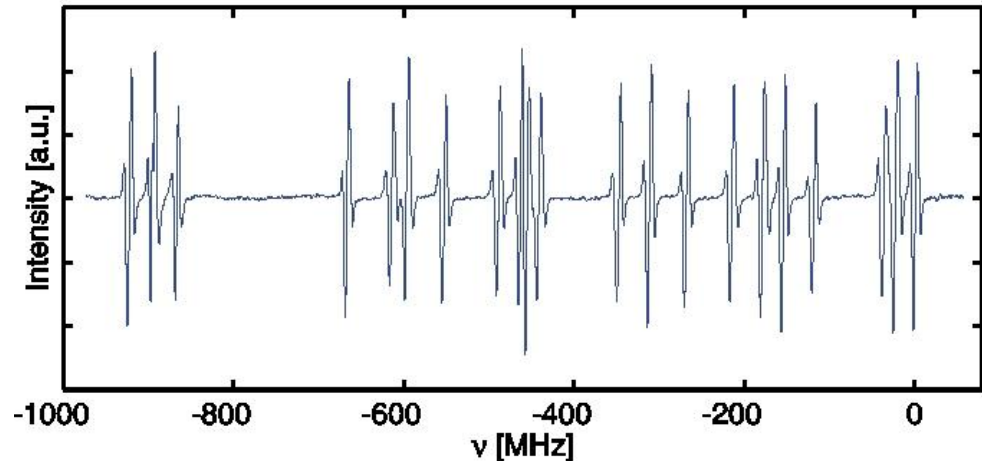


Spektroskopie s laserovými diodami

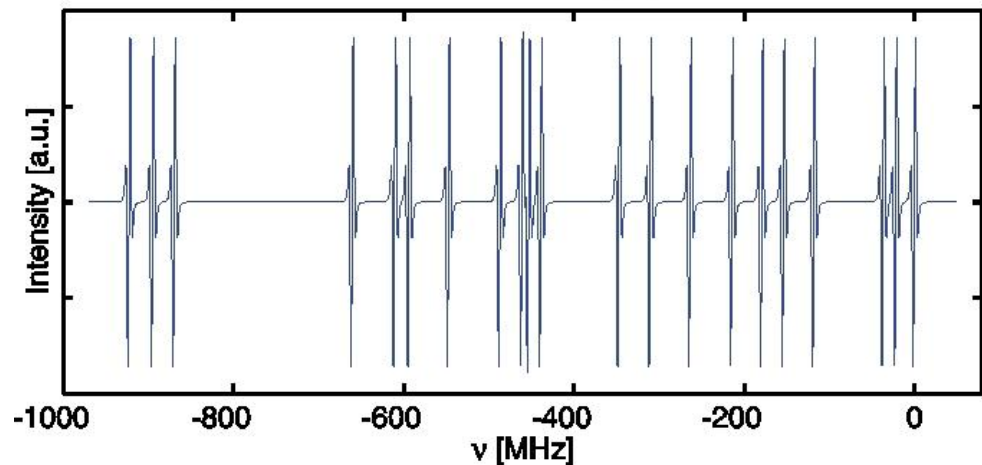
Spektroskopie v
molekulárním jódu
P(33)6-3 at 633 nm

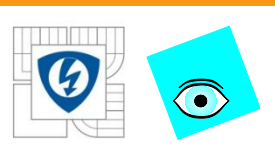
Simulace a reálně
naměřené spektrum

(b) Experimental record of the P(33)6-5 transition



(c) Theoretical model of the P(33)6-5 transition





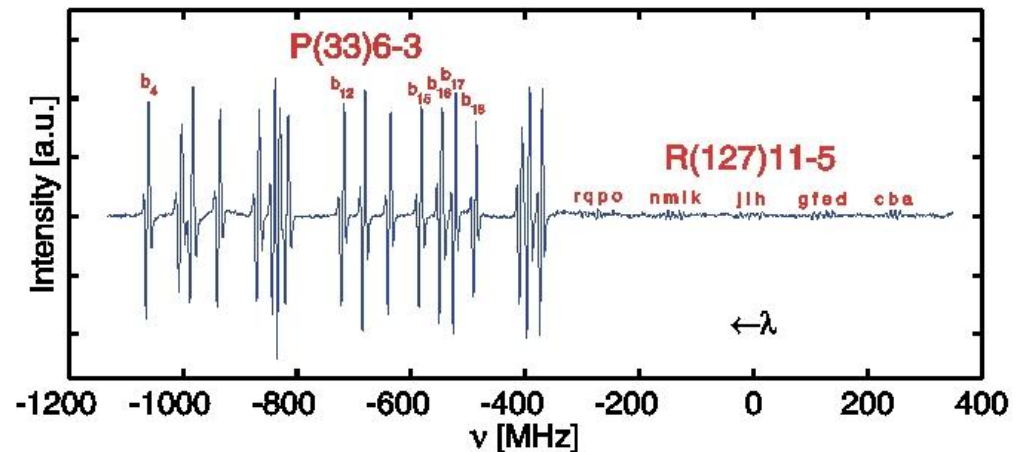
Spektroskopie s laserovými diodami

Spektroskopie v
molekulárním jódu
P(33)6-3 at 633 nm

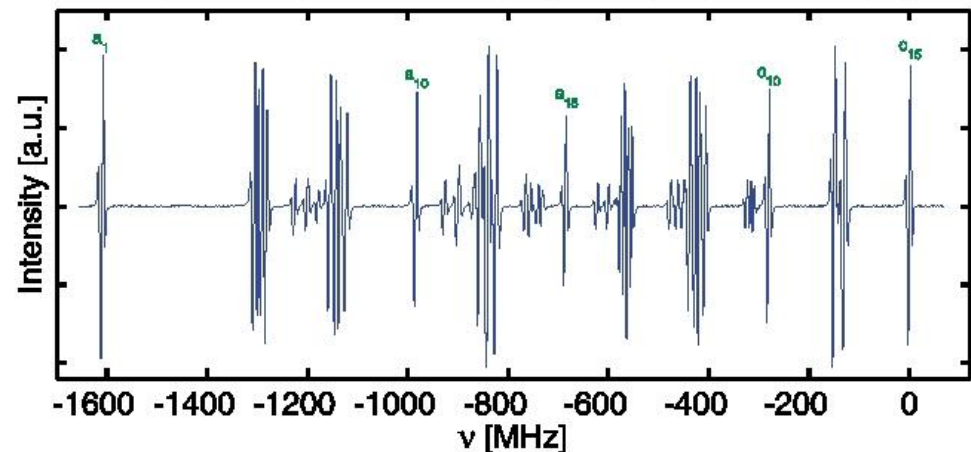
Detailní záznam:
P(33)6-3 and
R(127)11-5

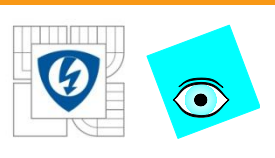
R(60)8-4
R(125)9-4
P(54)8-4

(a) Transitions P(33)6-3 and R(127)11-5



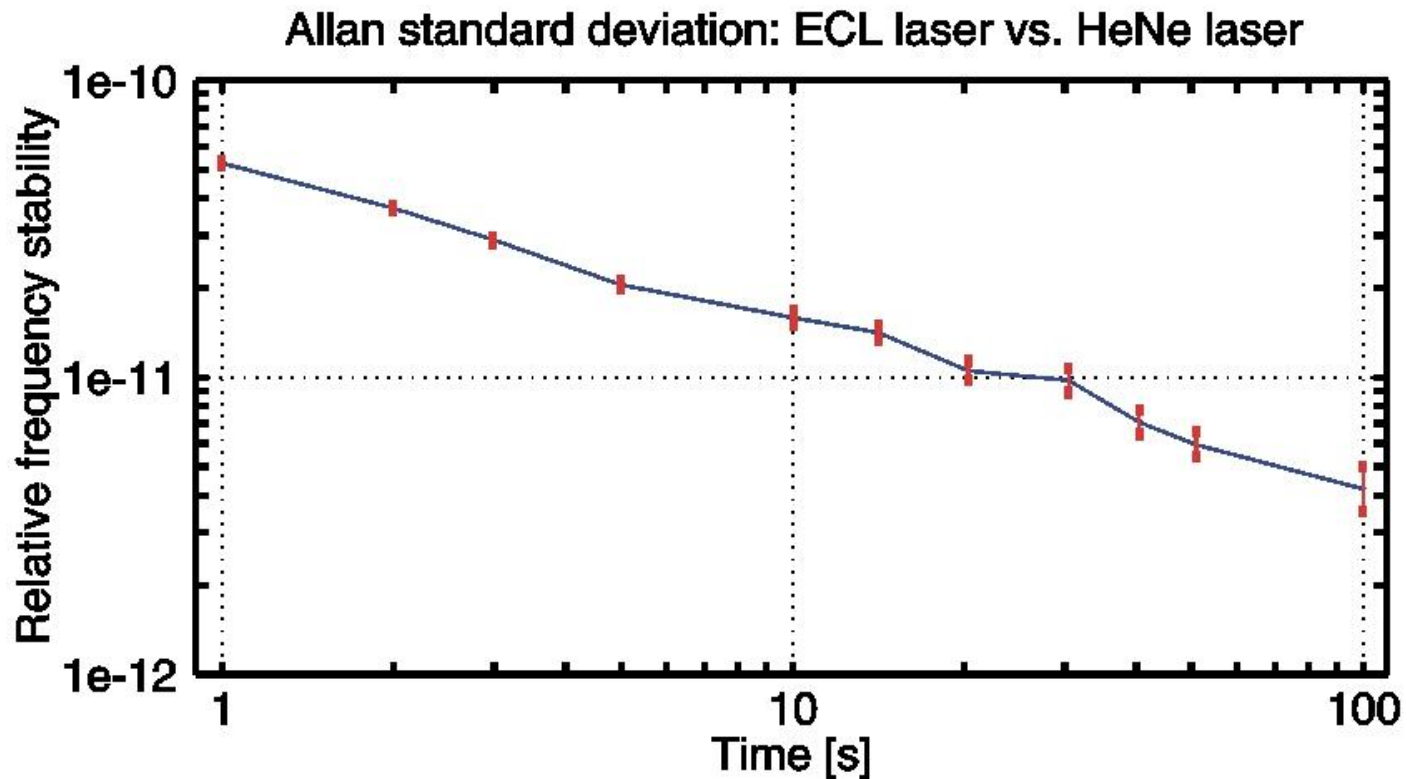
(b) Group of strong transitions R(60)8-4, R(125)9-4 and P(54)8-4

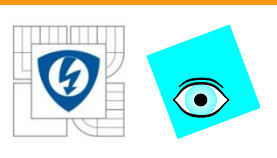




Spektroskopie s laserovými diodami

Záznam dlouhodobé stability ECL laseru stabilizovaného pomocí spektroskopie v molekulárním jódu P(33)6-3 at 633 nm

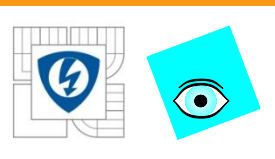




Spektroskopie s laserovými diodami

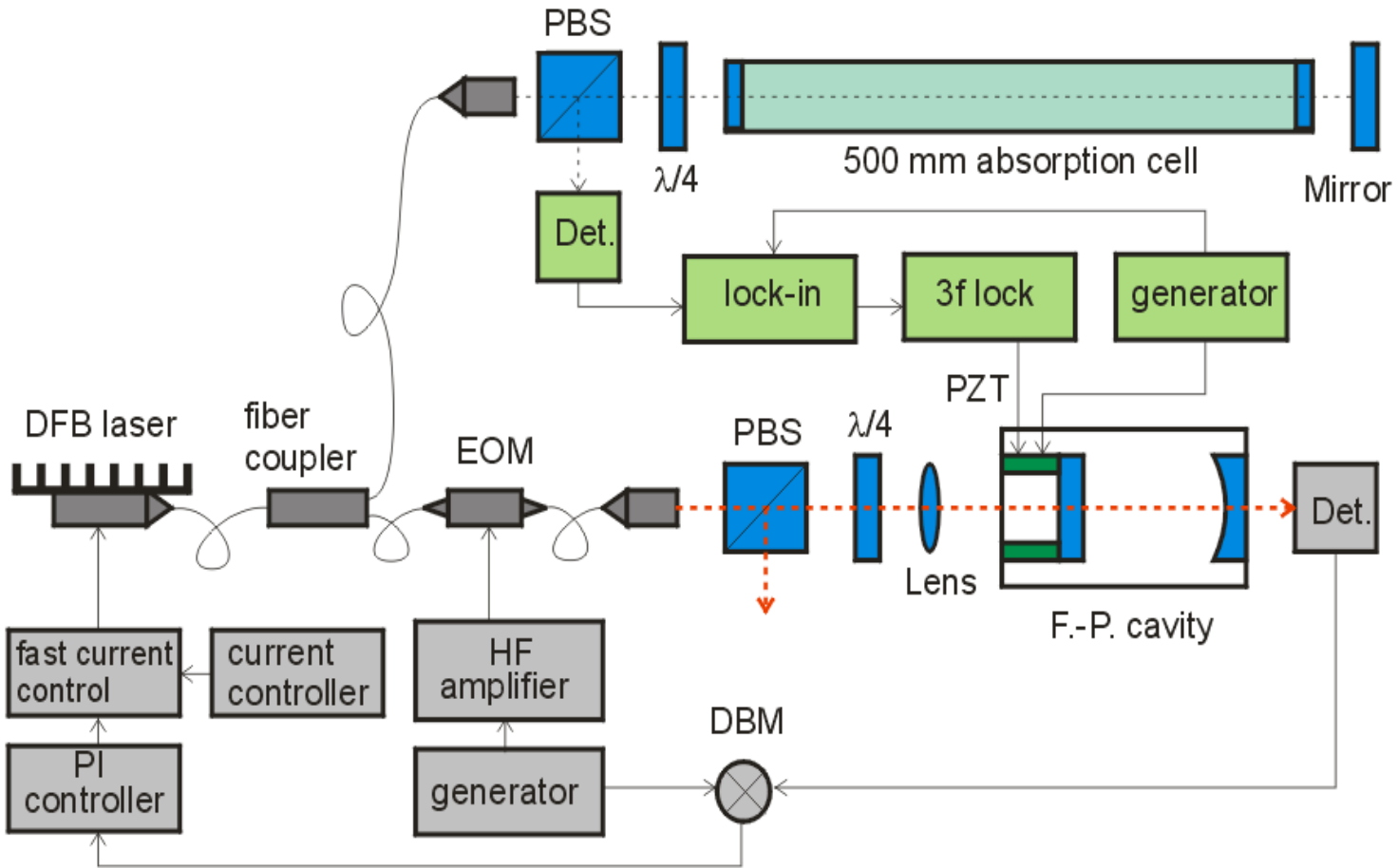
Shrnutí dosažených parametrů u ECL laseru na 633nm

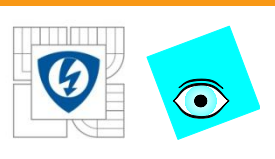
unknown (transition)	reference (transition)	mean(Δf)	mean(σ)	rel. stability 100 second
ISI1 – ECL <i>P(33)6-3</i>	He-Ne-I ₂ <i>R(127)11-5</i>	40 kHz	25 kHz	$5 \cdot 10^{-12}$
ISI1 – ECL <i>P(33)6-3</i>	BNM – ECL <i>P(33)6-3</i>	40 kHz	25 kHz	$5 \cdot 10^{-12}$
ISI1 – ECL <i>R(60)8-4,</i> <i>R(125)9-4,</i> <i>and P(54)8-4</i>	BNM – ECL <i>R(60)8-4,</i> <i>R(125)9-4,</i> <i>and P(54)8-4</i>	19 kHz	14 kHz	« 10^{-12}



Spektroskopie s laserovými diodami

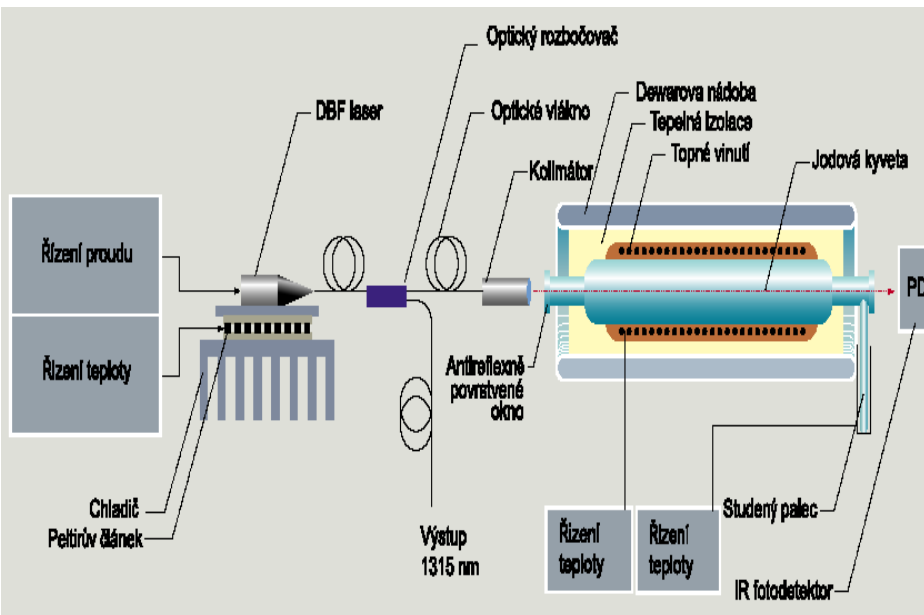
Spektroskopie s DFB laserem v izotopickém acetylénu





Spektroskopie s laserovými diodami

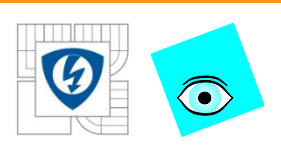
Spektroskopie s DBR laserem v tepelně disociovaném jodu



Master oscillator of pulsed power laser PALS at 1315 nm

6.12.2012

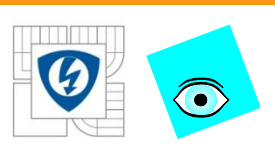
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

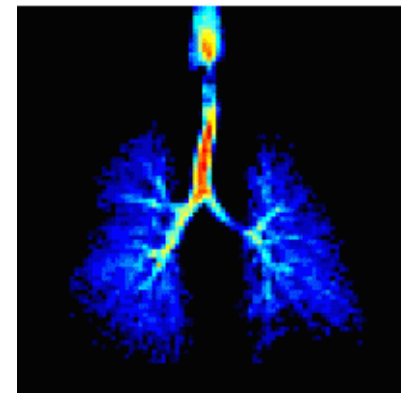
Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. (ÚPT AV ČR, v.v.i.)

6.12.2012



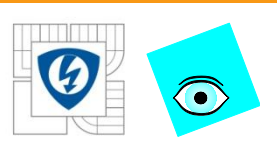
Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

Motivace – NMR zobrazování



6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



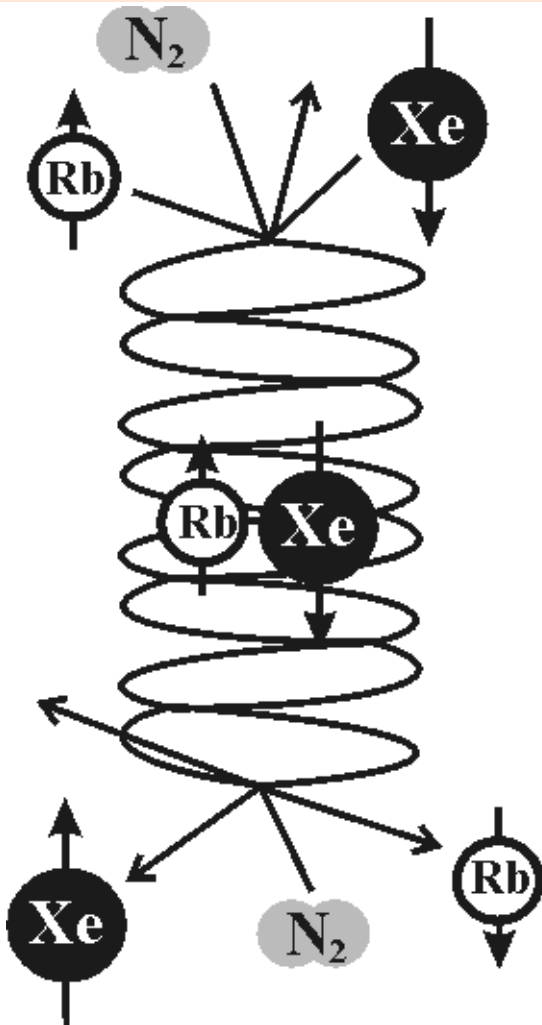
Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

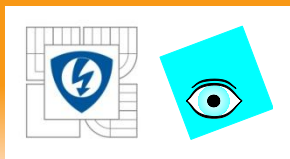
VÝMĚNA SPINU

Polarizované atomy Rb (a K) mohou vyměnit polarizaci spinu elektronu s jiným spinem, např. s jaderným spinem atomů vzácných plynů

- výměna spinu s ^3He se děje binárními srážkami

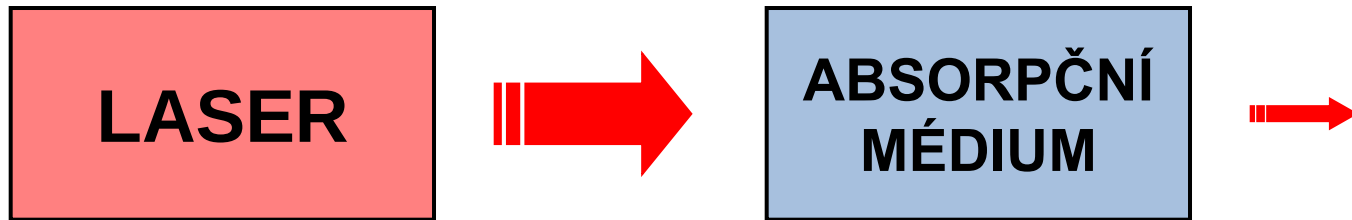
- výměna spinu s ^{129}Xe se děje prostřednictvím vzniku van der Waalových molekul s delší dobou života (výrazně vyšší efektivita, než u He)





Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

Optimalizace procesu optického čerpání

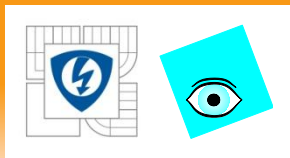


Redukce emisního spektra laseru

**Střední vlnová délka
794,7 nm**

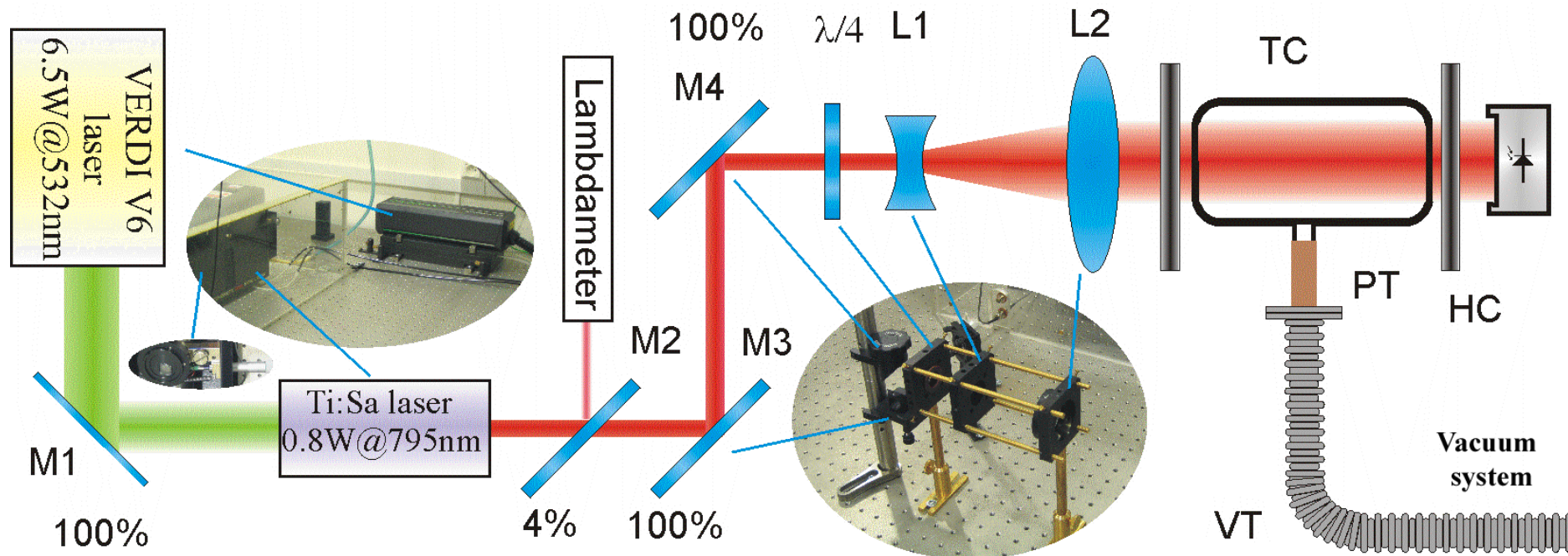
**Rozšíření absorpční
čáry rubidia**

**Srážkové rozšíření
45 GHz @ $3 \cdot 10^5$ Pa
max. 200 GHz @ $1 \cdot 10^6$ Pa**

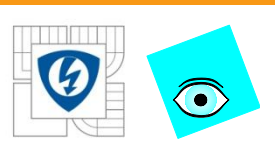


Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

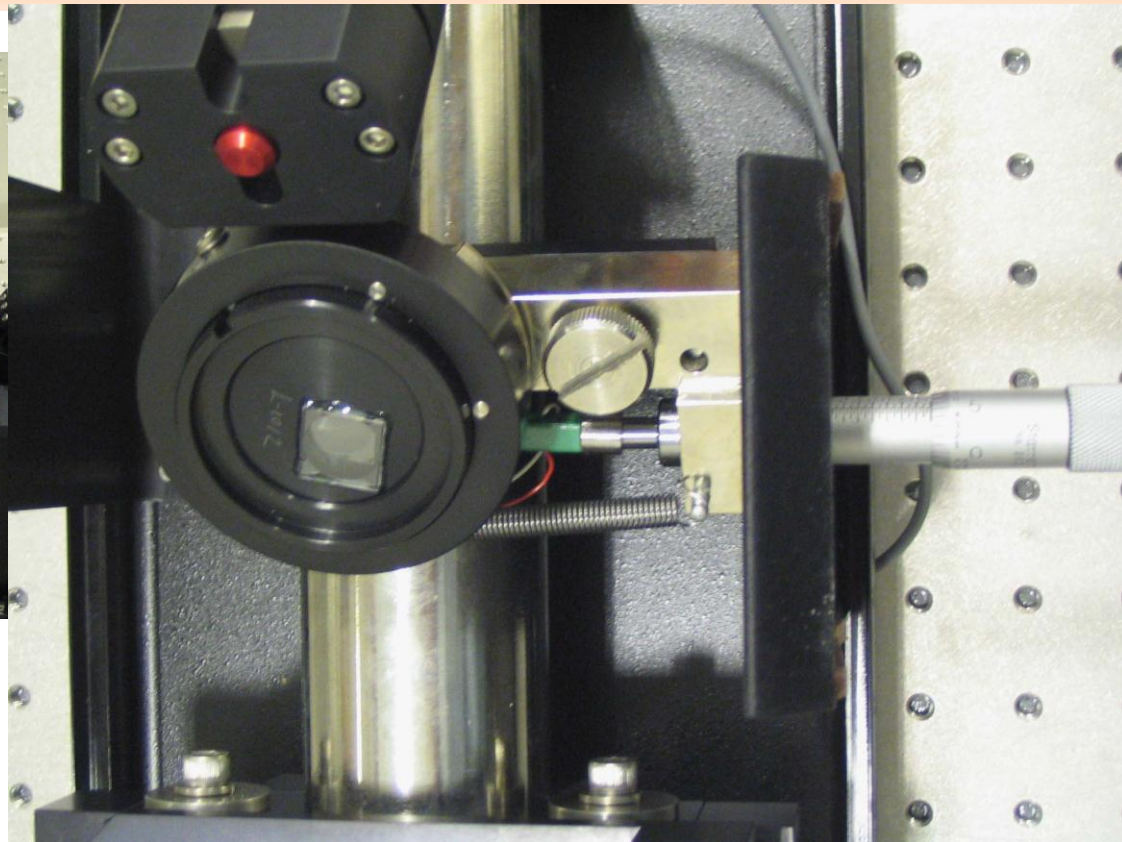
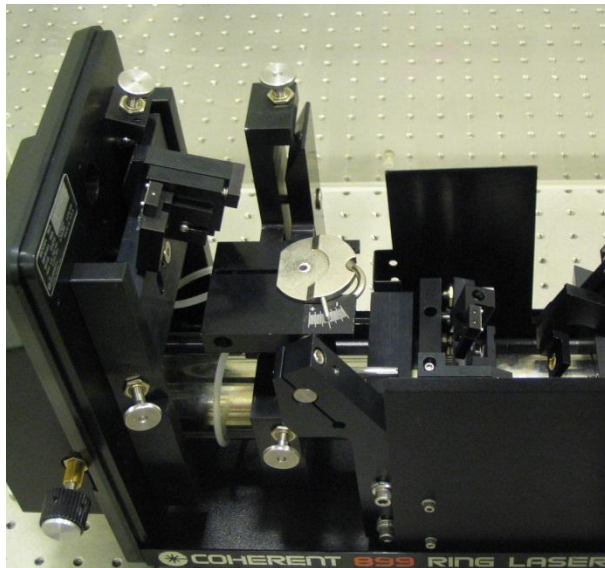
Optická sestava s Ti:Sa laserem



M2 - částečně odrazné zrcadlo; *M3*, *M4* - optický periskop; $\lambda/4$ - čtvrtvlnná deska; *L1*, *L2* - optický teleskop; *HC* - Helmholtzovy cívky; *PD* - fotodetektor; *TC* - kyveta



Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod



Ti:Sa Laser 899-01 (Coherent)

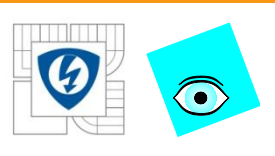
Šířka emisní čáry

- bez etalonů 25 GHz
- s etalony 10 MHz

6.12.2012

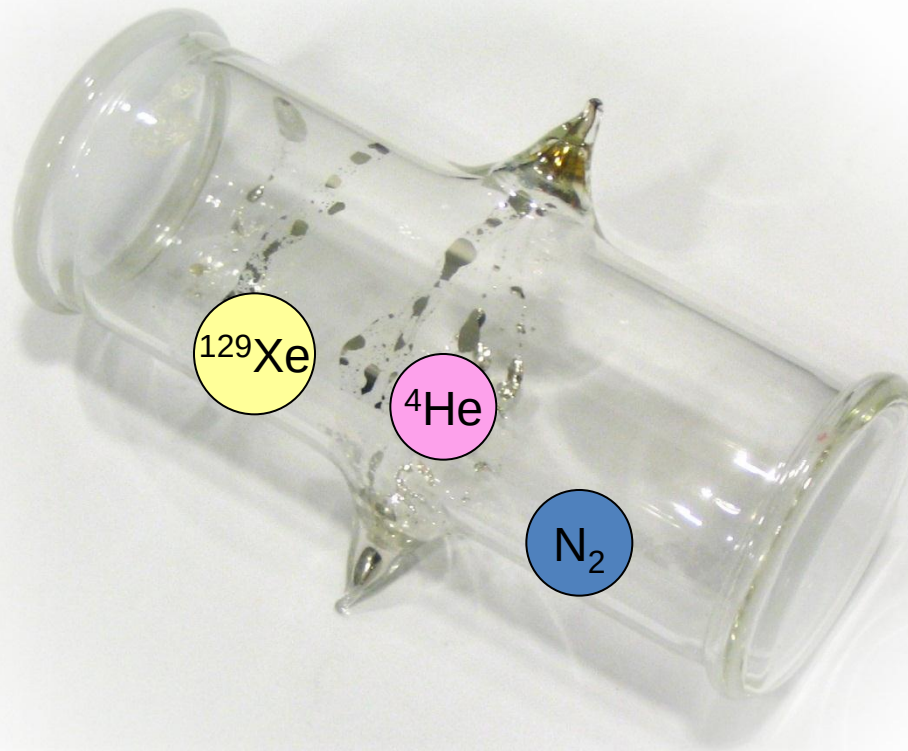
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



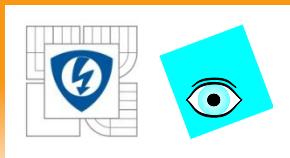


Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

Rb – šířka absorpční čáry

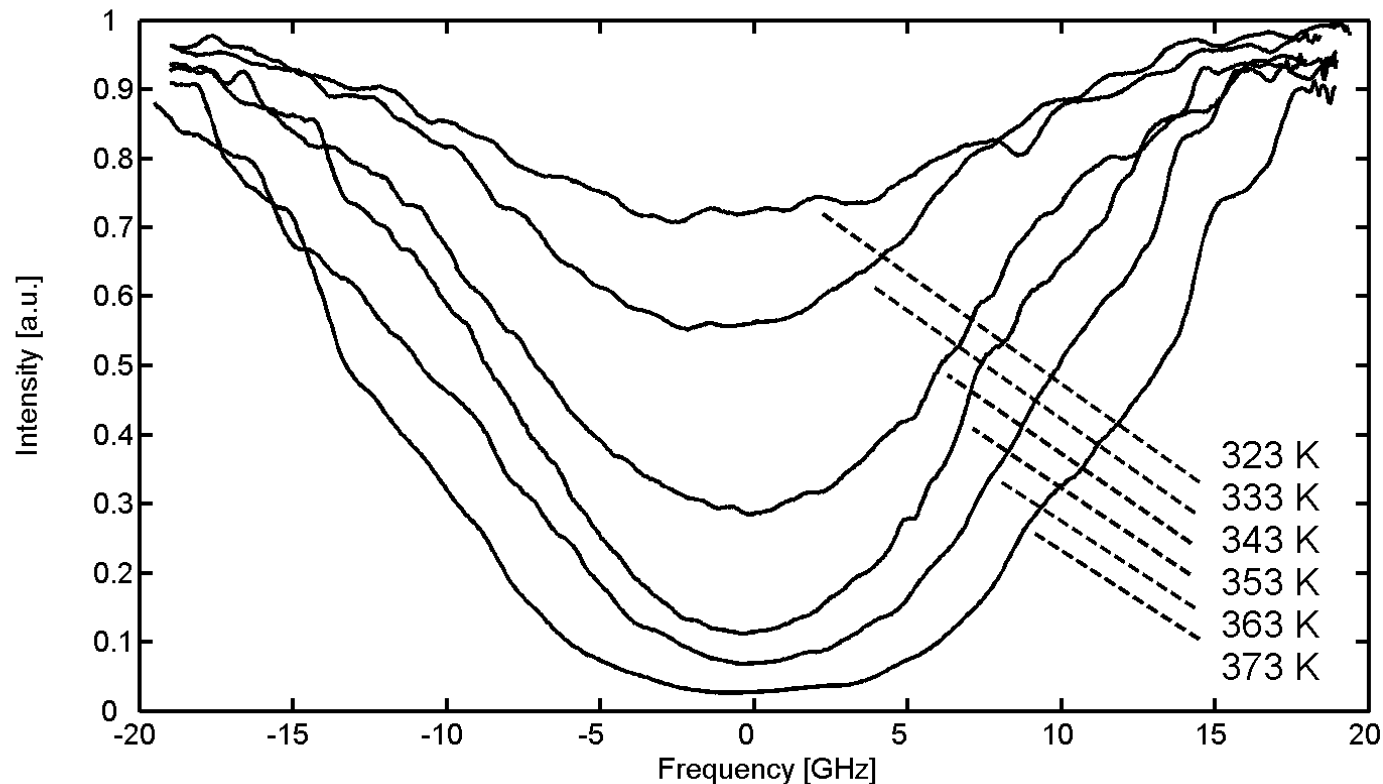


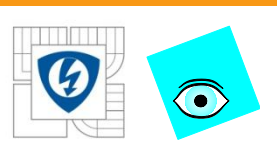
$^{129}\text{Xe} \dots 100 \text{ kPa}$ and $\text{N}_2 \dots 200 \text{ kPa} \approx 45 \text{ GHz @ } 100^\circ\text{C}$



Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

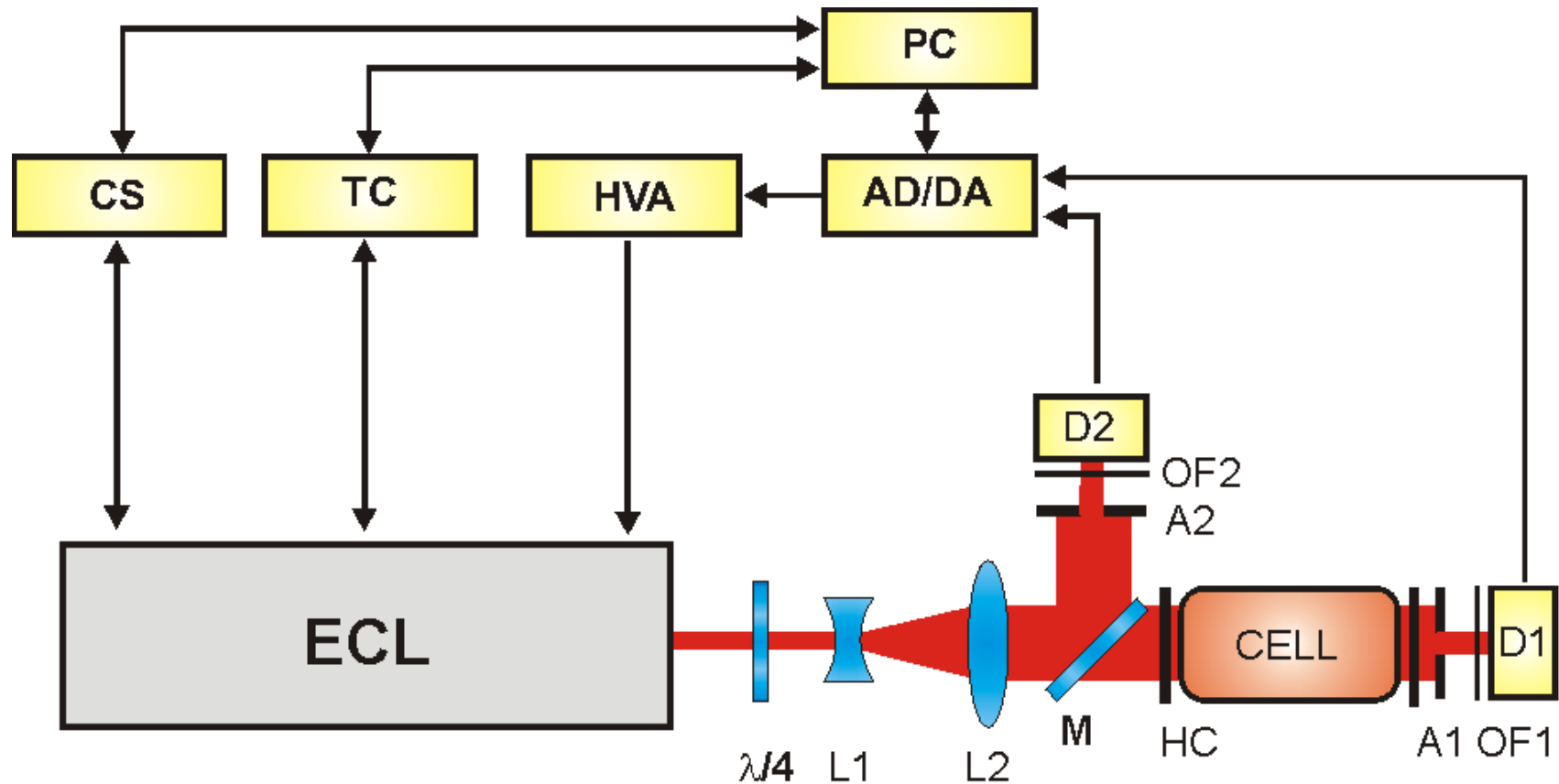
Rb – šířka absorpční čáry





Zvyšování koherence výkonových polovodičových laserů a polí laserových diod

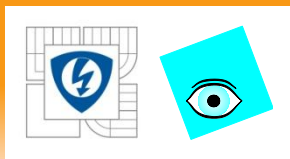
Dlouhodobá efektivita procesu optického čerpání



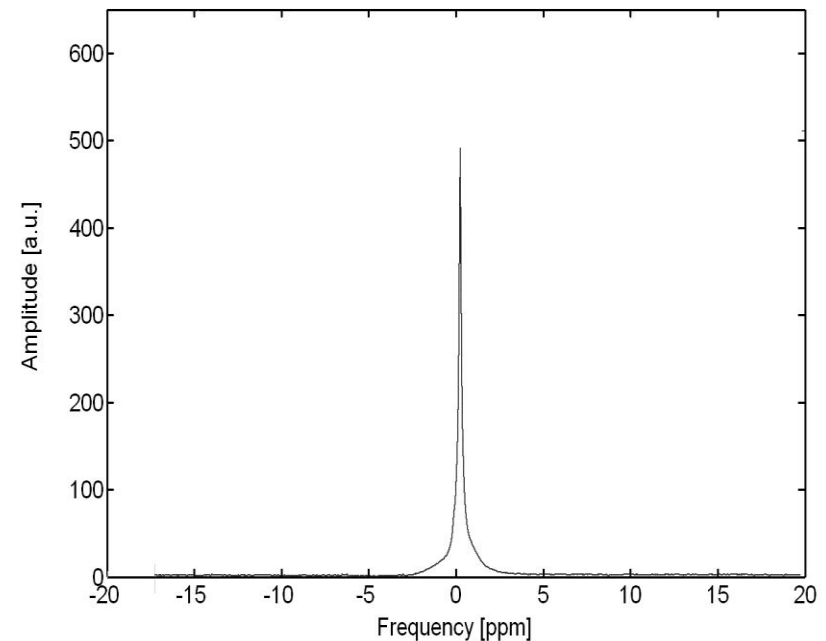
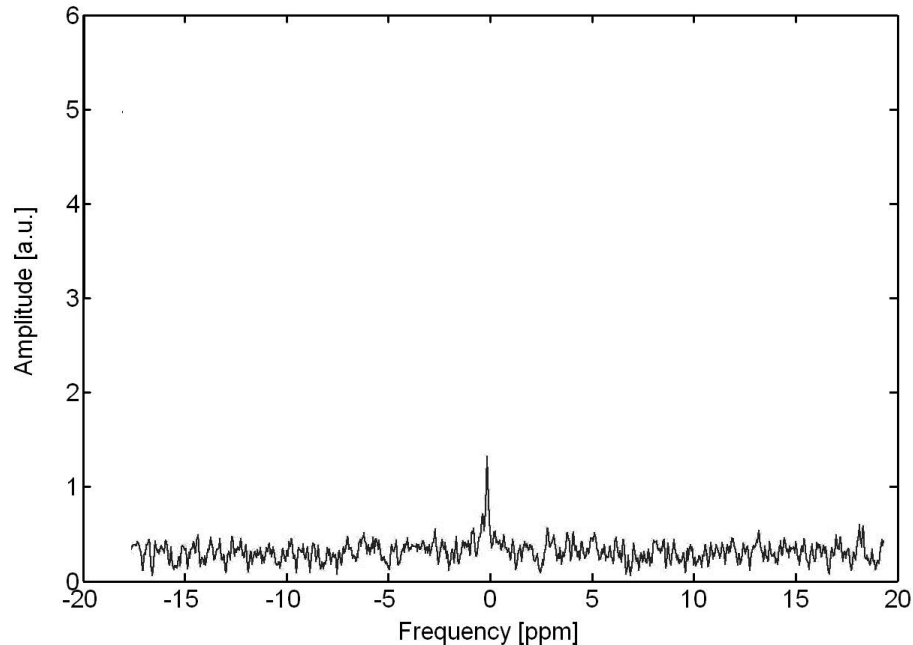


[illegible]

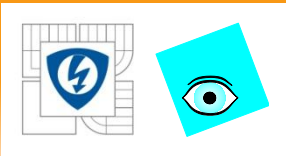
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

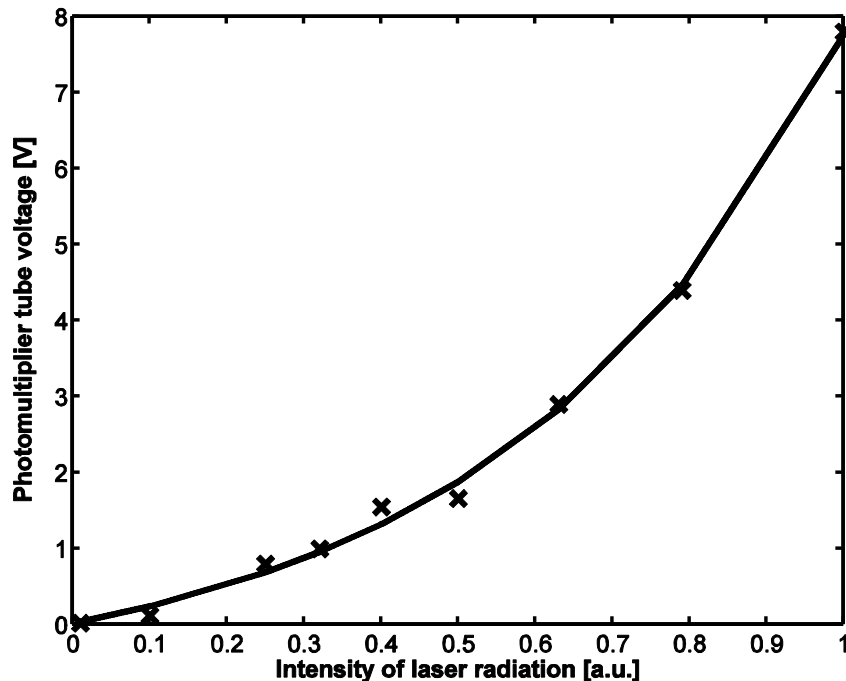


Spektrální čáry ^{129}Xe v přirozeném (vlevo) a polarizovaném (vpravo) stavu. Amplituda spektrální čáry polarizovaného xenonu je přibližně 400 krát větší než v případě xenonu nepolarizovaného. Rezonanční kmitočet ^{129}Xe je 54.267 MHz.



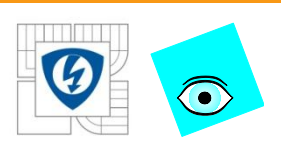
Spektroskopie s výkonovým polem laserových diod

Fyzikální a technická omezení čerpání...

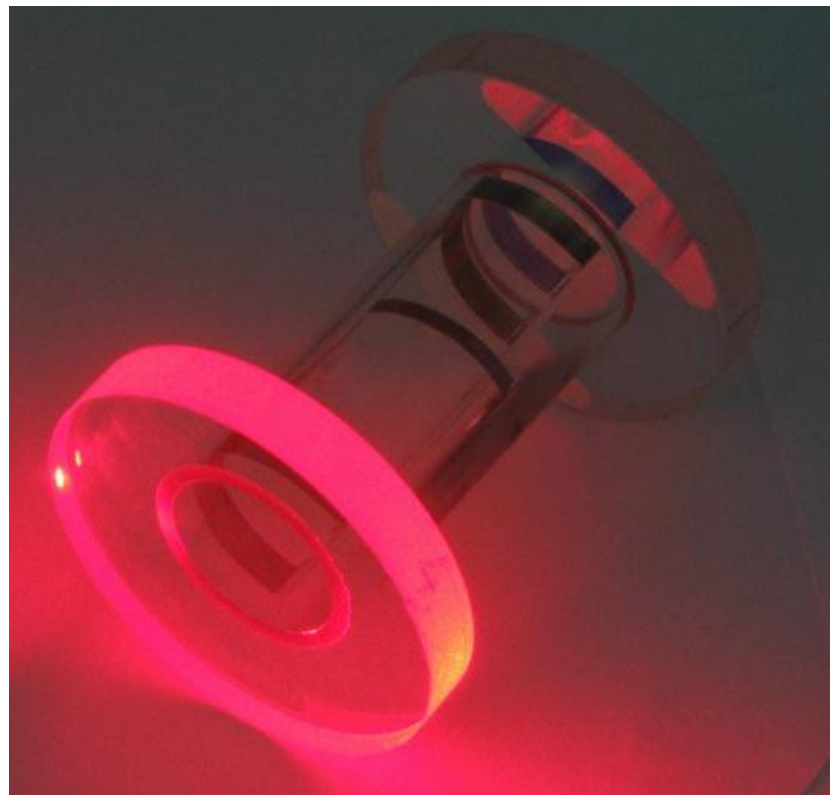


Plošná hustota výkonu

$< 0,1 \text{ W/mm}^2$



Děkujeme za pozornost



Ondřej Číp
Zděnek Buchta

6.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

