

Typy laserů

prof. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D.

zemanek@isibrno.cz

- plynové lasery (HeNe, iontové, excimerové)
- kapalinové (barvivové lasery)
- pevnolátkové (rubínový, Nd:YAG, Ti:Safírový)
- laserové diody, vláknové lasery,
- lasery s volnými elektrony,
- X-lasery

Literatura

B. E. A: Saleh, M. C. Teich: Fundamentals of Photonics

M. Vrbová: Lasery a moderní optika

<http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Historie

První laser uvedl do provozu T. H. Maiman 15. 5. 1960 - rubínový v pulsním režimu

První plynový (He-Ne) laser :

A. Javan, W. R. Bennet, D. R. Herriott

leden 1961 - kontinuální na 5 čarách (1118-1207 nm).

1962 - viditelný 632.8 nm

U nás :

Neodymový laser , Dr. K. Pátek, Fyzikální Ústav ČSAV, 1963

Rubínový, Ing. J. Pachman, Voj. výzkumný ústav Praha, 1963

He-Ne (infra), Ing. F. Petrů, ÚPT ČSAV Brno, podzim 1963

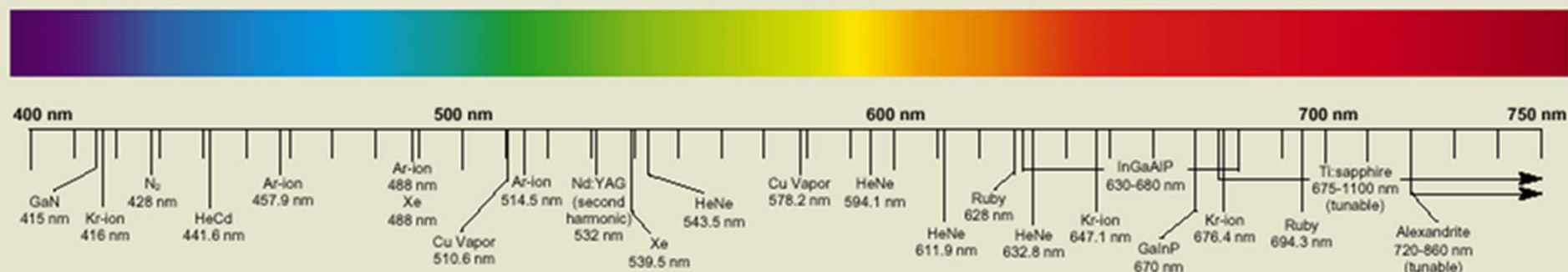
He-Ne (632.8nm), Ing. F. Petrů, ÚPT ČSAV Brno, jaro 1964

Následuje velmi prudký rozvoj v různých aktivních prostředích, dnes existuje přes 1000 různých aktivních prostředí, ve kterých byly realizovány různé typy laserů.

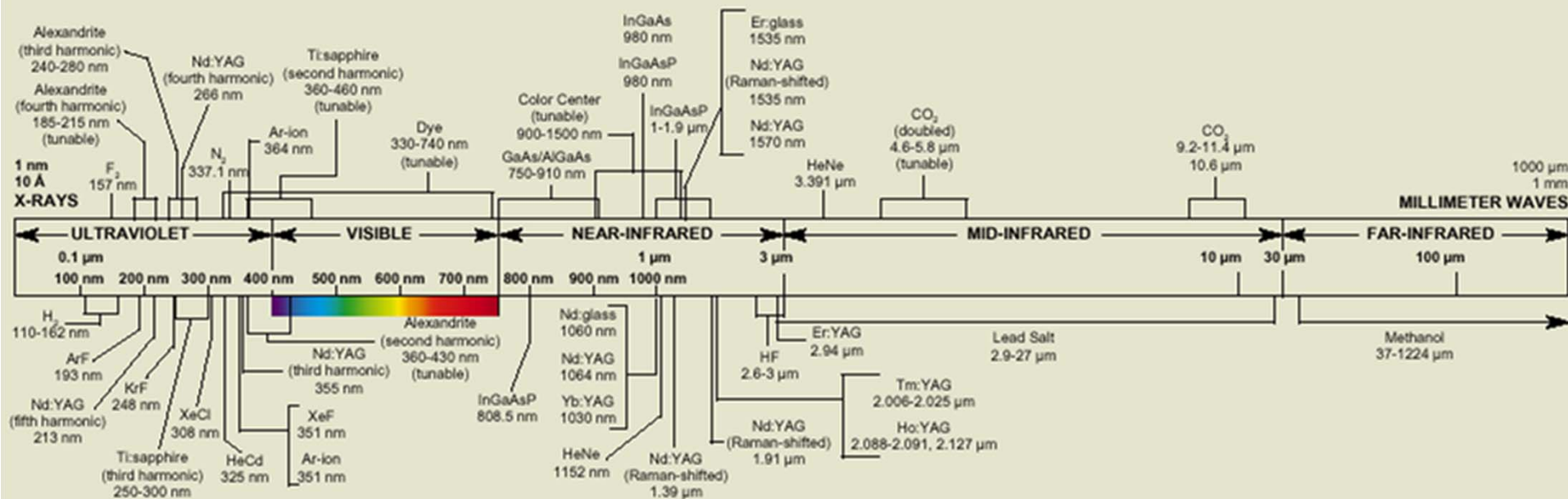
The Photonic Spectrum Reference Chart

The wavelength spectrum from VUV to FIR with laser lines from 1 nm to 100 μm

VISIBLE



The photonic spectrum reference chart displays the major commercial laser lines in the ultraviolet to the far-infrared and beyond. Space limitations make it impossible to include all available lasing media, and, particularly in the crowded areas of the visible spectrum and the near-infrared, we were forced to limit their multiple secondary lines to the more familiar. In drawing the full spectrum band, legibility received a higher priority than accurate scale or proportion.



Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Pevnolátkové				
Rubínový laser	Rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	Neodym, YAG	1064 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho:YAG laser	Ho:YAG	2,1 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Er:YAG laser	Erbium, YAG	2,94 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safírový laser	titan, safír	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový laser	Alexandrit	700 - 800 nm	červená, IR	žihání, řezání
Barvivové				
Rhodamin 6G laser	Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	Kumarin C30	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie
Plynové - Atomární				
He-Ne laser	hélium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	měď	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	jód	342 nm, 612 nm, 1315 nm	viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
Plynové - Iontové				
Argonový laser	argon	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Hélium-kadmiový laser	hélium, kadmium	325 nm, 442 nm	UV, modrá	
Plynové - Molekulární				
Vodíkový laser	vodík	100 - 120nm, 140 - 165nm	UV	
CO ₂ laser	Oxid uhličitý	10,6 μm	IR	sváření, řezání, stomatologie
CO laser	Oxid uhelnatý	5 - 6,5μm	IR	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie
Dusíkový laser	dusík	337 nm	UV	
Polovodičové				
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, laserová tiskárna
GaAlAs laser	GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství

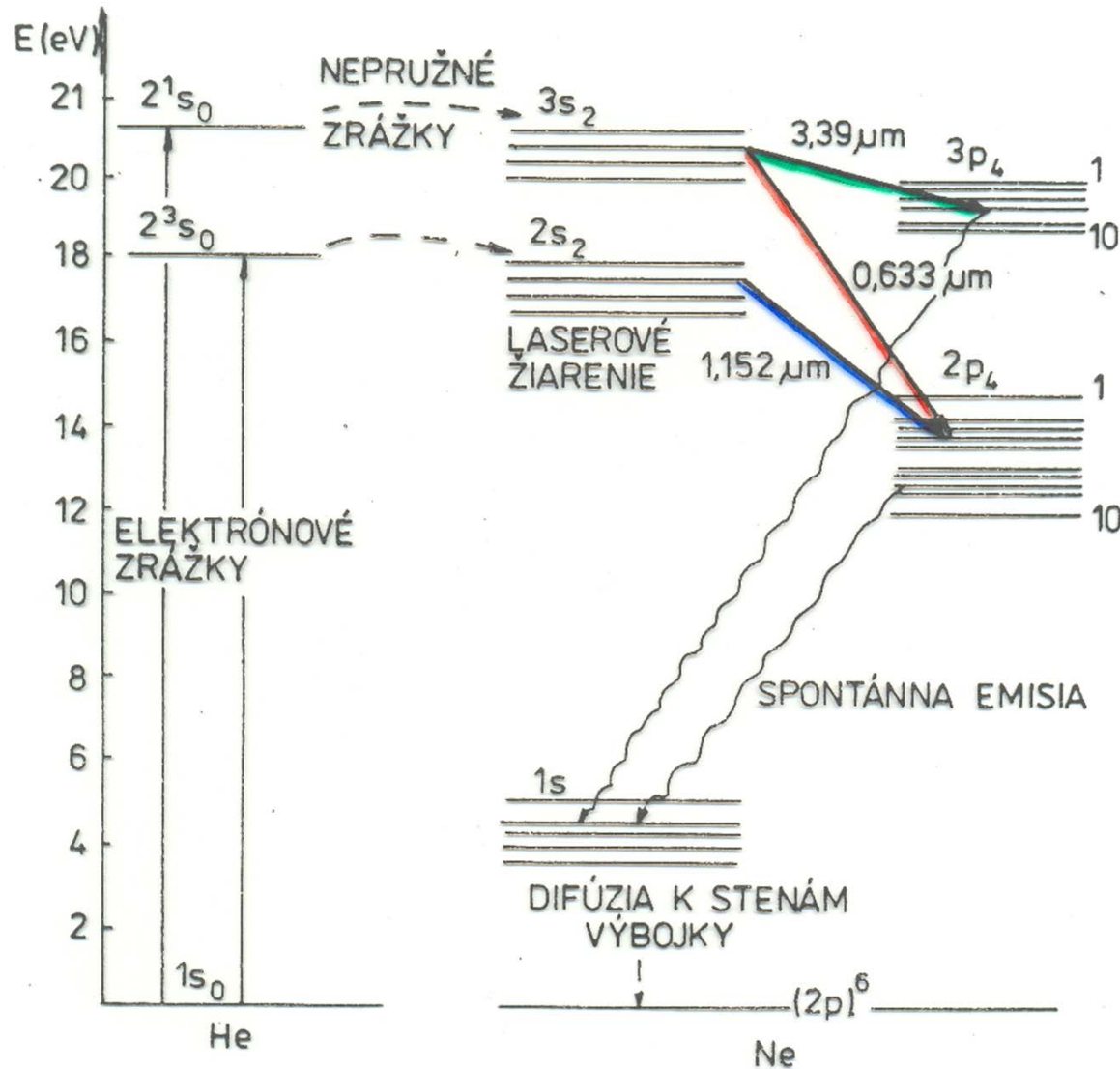
poznámka: UV ~ ultraviolet (ultrafialová), IR ~ infrared (infračervená)

<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/136340-laser#Rezon.C3.A1tor>

Plynové lasery

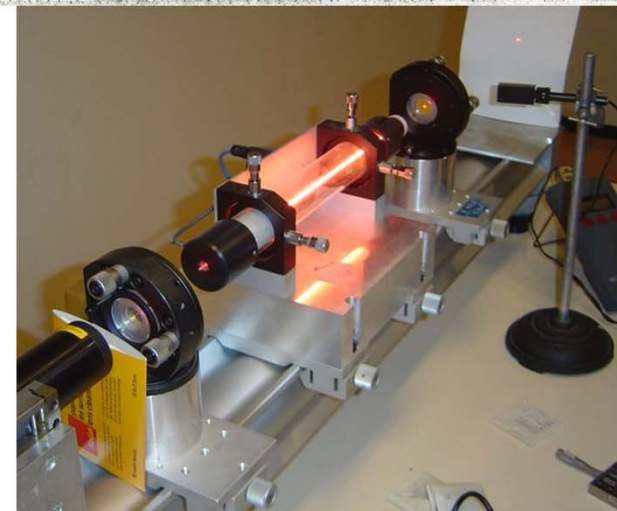
Typ	Vlnová délka [nm]	Typ	Vlnová délka [nm]	Typ	Vlnová délka [nm]
ATOMÁRNÍ		IONTOVÉ		MOLEKULÁRNÍ PŘECHOD :	
HeNe	544	Ar	275-477 (moc)	ELEKTRONOVÝ	
	594		488	H ₂	116
	612		514,5	N ₂	337
	633	Kr	413,1	EXCIMEROVÝ	
	730		468	Ar ₂	126
	1 150		520,8	Kr ₂	147
	1 523		530,9	F ₂	157
	3 390		647,1	ArF	193
XeNe	2 026	Ne	330-380 (moc)	KrCl	222
	3 506	Xe	526	KrF	249
			535	XeCl	308
			540	XeF	350
Au páry	628	HeCd	325	VIBRAČNÍ	
Cu páry	510		442	CO	5000-6500
	578		534	CO ₂	9000-11000
I	1 315		538	N ₂ O	10300-11100

Hélium-Neonový laser

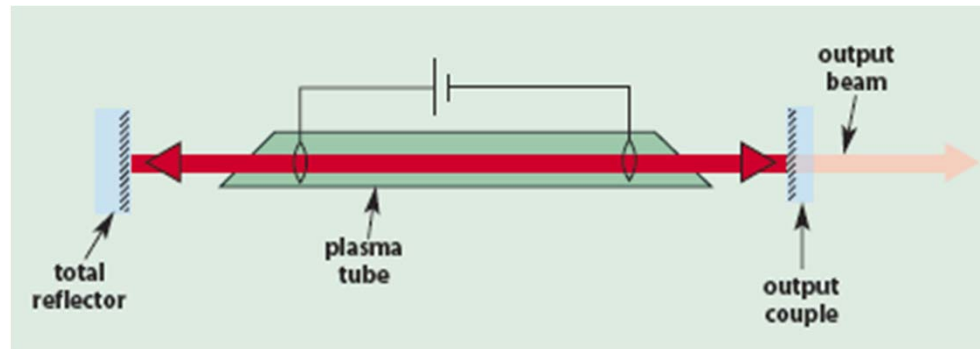
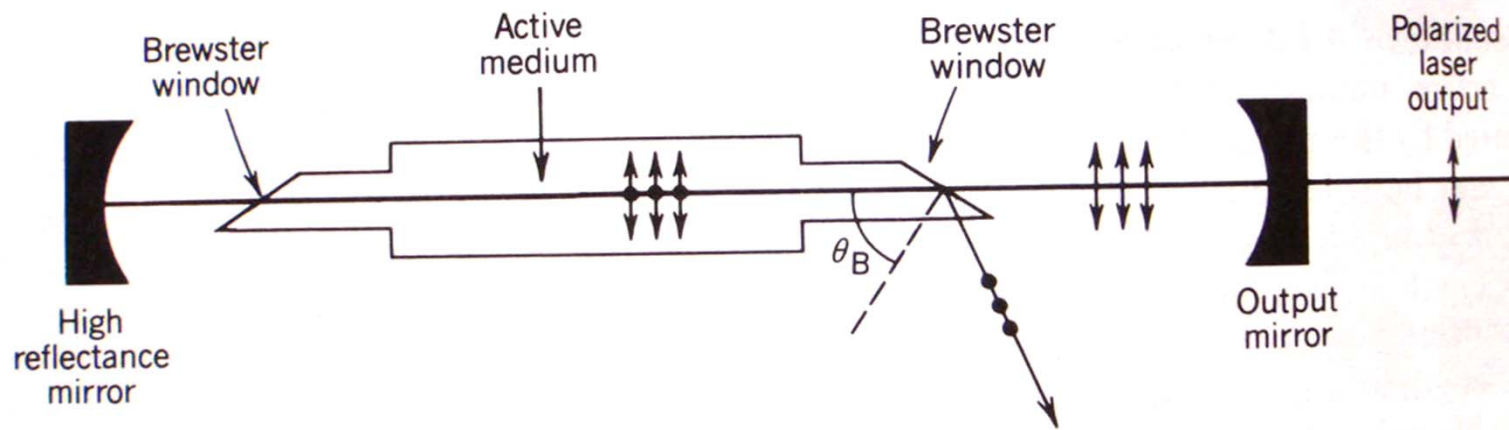


Helium neon wavelengths and power levels

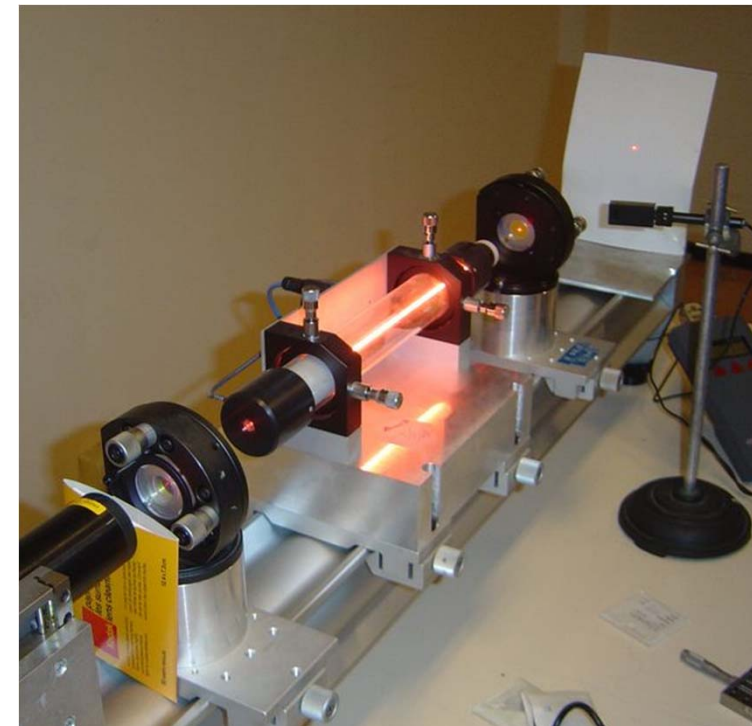
Wavelength (nm)	Maximum power (mW)	Gain (relative to 632.8 nm)
543.5	1.5	$1/17$
594.1	7.0	$1/15$
604	2.5	$1/10$
611.9	7.0	$1/5$
629	—*	$1/5$
632.8	75	1
635	—*	$1/8$
640.1	1.5*	$1/5$
730.5	0.3	$1/8$
1152.6	17.5	$4/5$
1523.5	1.5	—
2396	0.5	—
3392.0	24	$44/1$



Hélium-Neonový laser



Různých výstupních vlnových délek se dosahuje vhodnými odraznými vrstvami na zrcadlech.

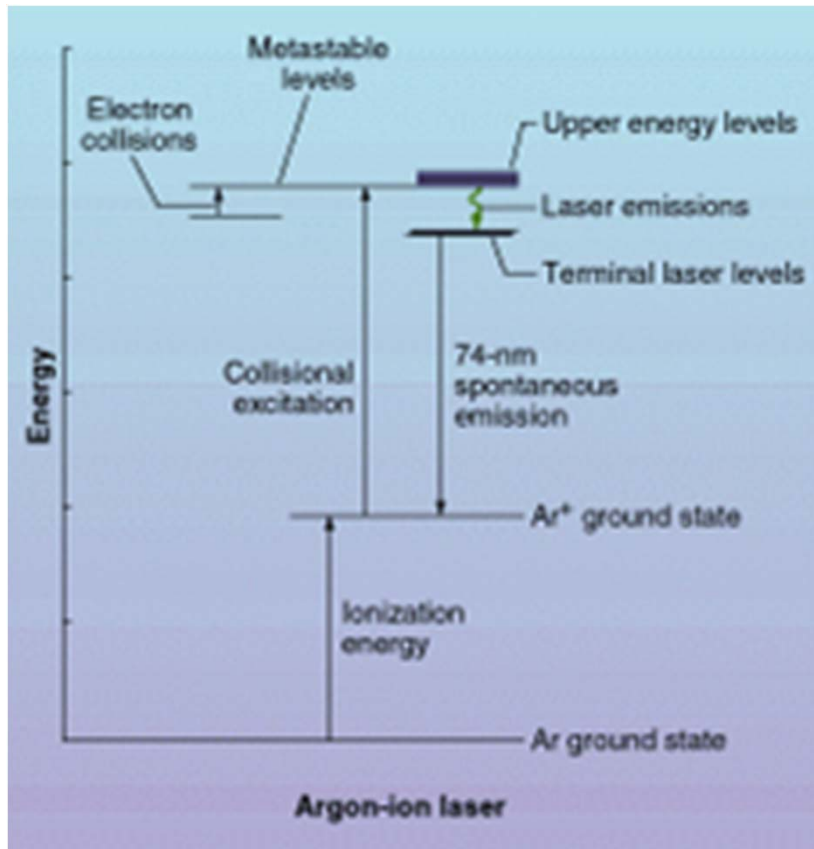


Hélium-Neonový laser

APLIKACE

- všude, kde je potřeba velmi koherentního záření TEM₀₀ modu o malém výkonu
- přístrojové aplikace - ozařování pacientů, navádění při chirurgických aplikacích (zelený), holografie, frekvenčně stabilizované lasery mají vyšší koherenci a používají se v metrologii (druhotný normál délky), interferometrii, měření rychlosti
- vyměřování a vytyčování přímek
- reprografie - v 80 letech osvit offsetových desek, vysokorychlostní xerografie
- čtečky čárového kódu - nejvýznamnější aplikace kolem roku 1990, nyní jsou postupně vytlačovány polovodičovými lasery (laserovými diodami).

Iontové lasery - argonový



- Vyšší kontinuální výkony (až 25 W) na mnoha vlnových délkách od blízké infračervené po ultrafialovou část spektra
- aktivním prostředím je plynný argon nebo krypton nebo směs obou o nízkém tlaku.
- čerpání je pomocí stejnosměrného výboje buzeného napětím od 200 po 500 V ale s velkým výbojovým proudem (do 65 A), který už dokáže ionizovat plyn.
- ionizovaný atom je sérií interakcí s elektrony výboje excitován do metastabilní hladiny odkud probíhá laserový přechod

Iontové lasery - argonový

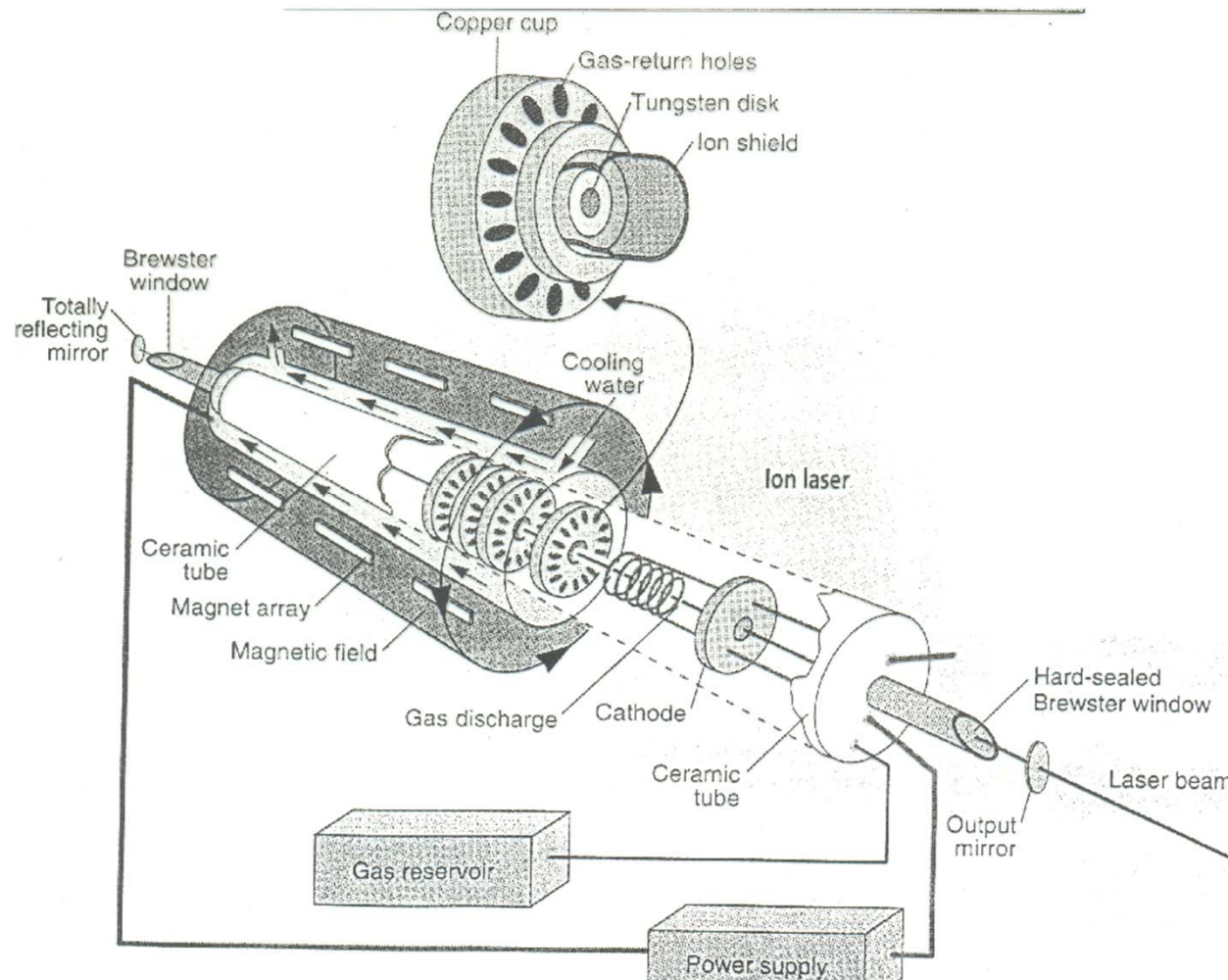
TABLE 1.

Summary of representative wavelengths (in nanometers) of krypton- and argon-ion lasers

KRYPTON	ARGON	(FREQUENCY-DOUBLED ARGON)
337.5	275.4	
350.7	300.3	
356.4	302.4	
406.7	305.5	
413.1	334.5	
415.4	335.8	
468.0	351.1	
476.2	363.8	
482.5	385.5	
	454.5	
520.8	457.9	229.0
	465.8	
	472.7	
530.9	476.5	238.2
568.2	488.0	244.0
647.1	496.5	248.2
676.4	501.7	250.8
752.5	514.5	257.2
799.3	528.7	264.3
	1090.0	

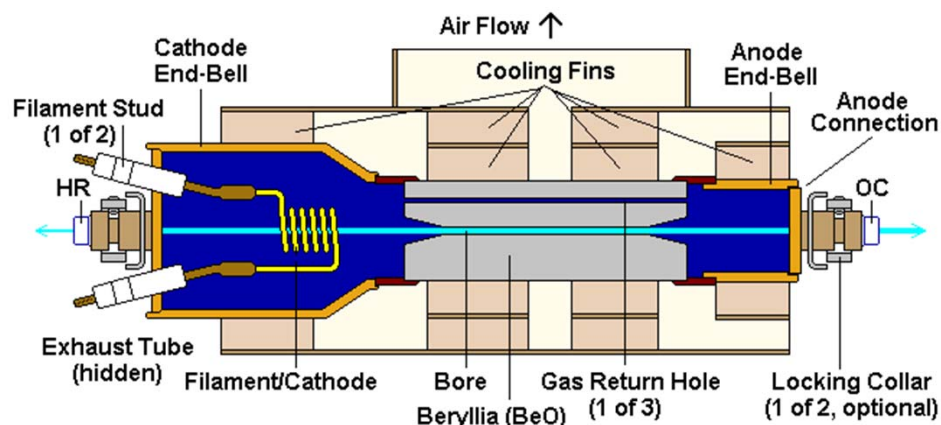
➤ existuje spousta stimulovaných přechodů v jednou a dvakrát ionizovaných atomech vzácných plynů (viz. tabulka). Pro Ar⁺ jsou nejčastější 488 nm a 514,5 nm. Pro Kr⁺ 647,1 nm. V poslední době se množství ultrafialových vlnových délek rozšiřuje o délky buzené v nelineárních krystalech (beta barium borát BBO) procesem zdvojnásobením základní frekvence.

Iontové lasery - argonový



- omezená doba života (stovky hodin), rezonátory s kov-keramickým rezonátorem dosahují až 5000 h.
- vzhledem k tepelným nárokům se rezonátor konstruuje z materiálů jako je SuperInvar, které mají malou tepelnou roztažnost, pokud to nestačí a dochází k termálnímu ovlivnění činnosti laseru, tak se využívá aktivní justování zrcadel rezonátoru na maximální výkon.
- dlouhou dobu byly nedostižné vzhledem ke svým vysokým CW výkonům v krátkovlnné oblasti spektra, v poslední době jim konkurují diodami čerpané pevnolátkové lasery se zdvojnásobenou frekvencí (532 nm z NdYAGu).
- UV oblasti doposud nemají CW konkurenta s ohledem na kvalitu svazku a výkon.

Iontové lasery - argonový



Structure of Typical Cynonics/Uniphase Argon Ion Laser Tube



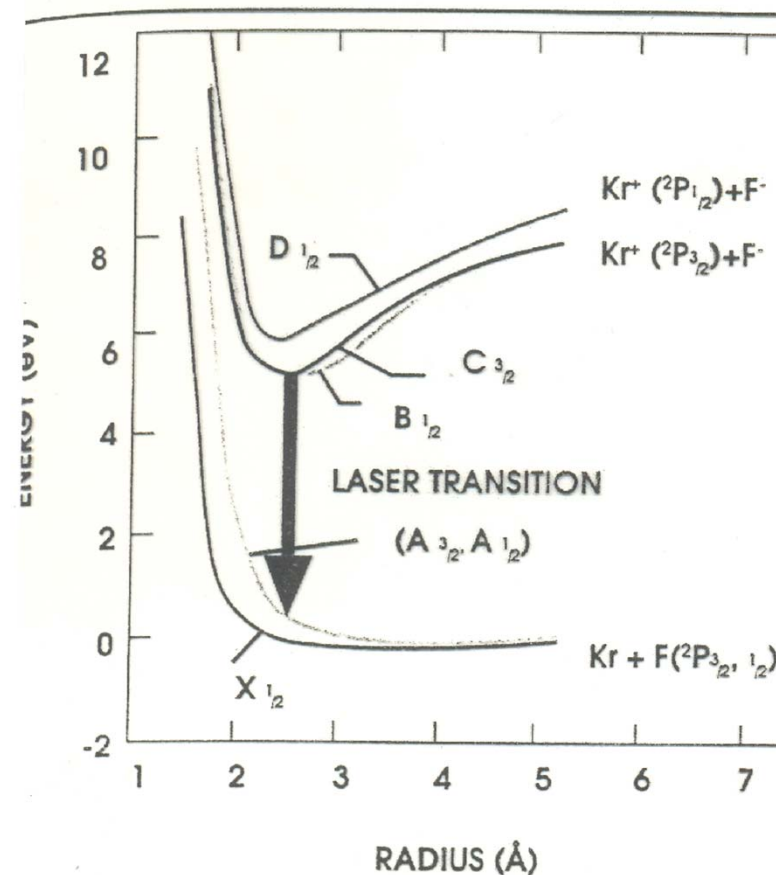
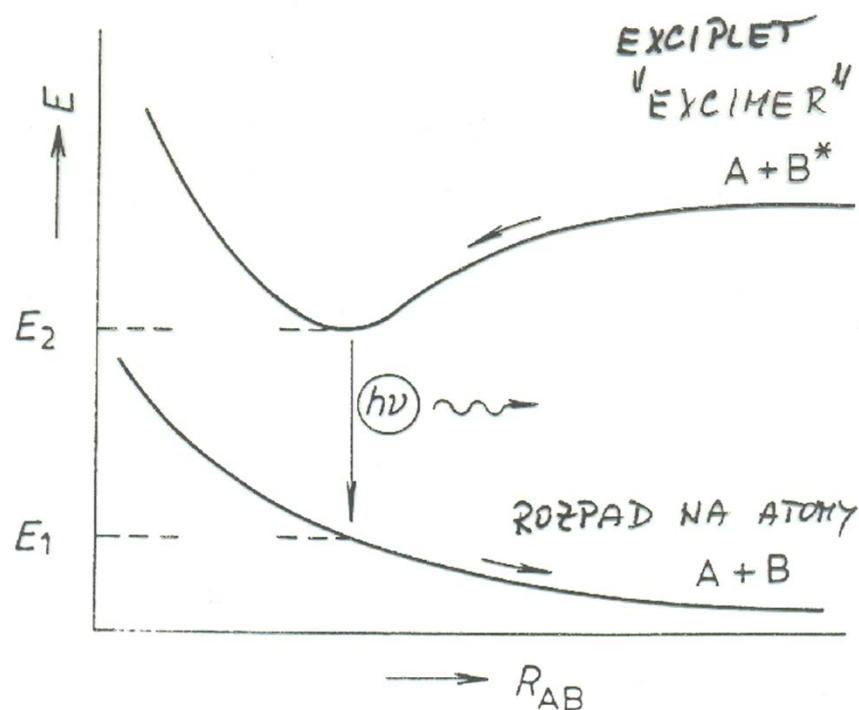
APLIKACE

modrozelené: využívají se na vysokorychlostní tisk řízený počítačem, exponování tiskařských desek a filmů. Zapisují data na masky disků, používaných pro produkci CD, CD-ROM.

viditelné : dopplerovské rychloměry; stimulují fluorescenci olejů obsažených v otiscích prstů; v biologii způsobují fluorescenci barviv, kterými se značí fragmenty DNA nebo buněk; osvětlování v konfokálních mikroskopech.

ultrafialové: stereolitografie - 3D modely jsou vytvářeny vrstva po vrstvě. Světlo je fokusováno na kapalný roztok monomerů, který po vystavení UV záření tvrdne, tvorba Braggových mřížek v optických vláknech, které řídí propustnost vlnových délek (kanálů) v WDM komunikačních systémech.

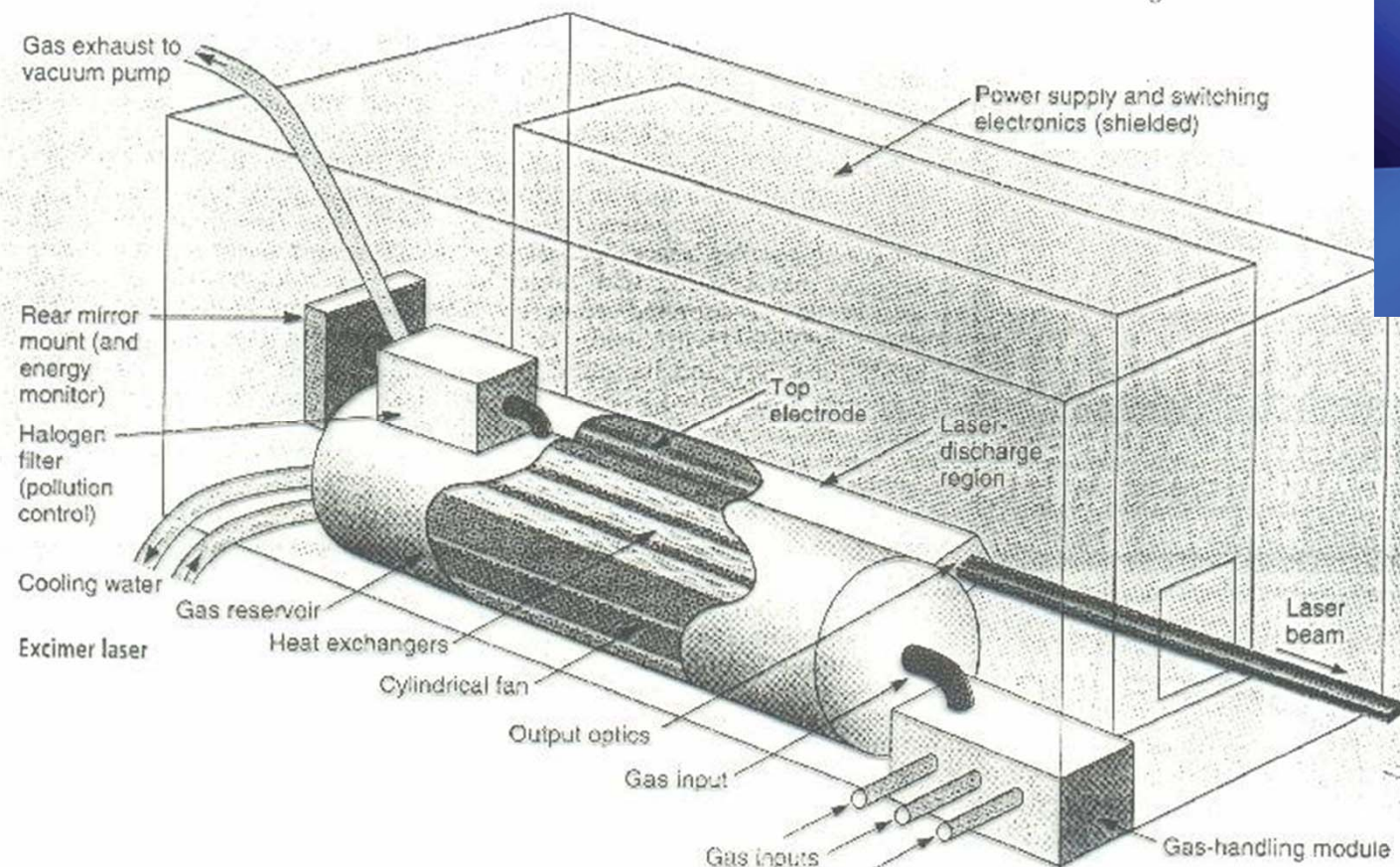
Excimerové lasery



➤ v aktivním prostředí interakce halogenů (Kr, F) s atomy vzácných plynů (Ne). Při průchodu vysoce energetického elektrického pulsu (elektronového svazku, RF pulsu) směs těchto plynů se atomy excitují a mohou vytvořit molekulu zvanou exciplet (excimer je molekula vytvořená ze stejných atomů, kdy jeden z nich je v excitovaném stavu) za pomoci srážky s atomem vzácného plynu, který dodá energii potřebnou k vytvoření excitované molekuly.

➤ Po stimulované akci se molekula dostává do základního stavu, který však není vazebný a molekula se rozpadá na volné atomy. To představuje velmi rychlé vyprazdňování základní hladiny laserového přechodu a tím i **extrémně vysokou účinnost** (teoreticky není potřeba rezonátoru).

Excimerové lasery



The use of all-metal/ceramic construction in excimer laser tubes delivers a dramatic impact on gas lifetime and overall tube lifetime.

➤ Pro srážku je třeba vysokého tlaku plynů. Dále je potřeba plyn předionizovat pomocí UV, X záření nebo koronového výboje, aby se výboj, který trvá cca 30-50 ns, mohl homogenně rozvinout. Proudové hustoty, které tečou výbojem, jsou až 1000 A/cm² a výboj musí dodávat špičkový výkon 10⁸ až 10⁹ W. Objem plynu, který se podílí na výboji je cca 0,01 celkového objemu.

➤ Je třeba obměňovat plyn nebo připouštět v průběhu, aby byly zachovány parametry laseru.

➤ Lasery pro průmyslové aplikace jsou nabízeny asi 20 let, doba života elektrod je cca 5x10⁹ pulsů (XeCl) nebo 2,5x10⁹ (KrF)

➤ cca 5-10 % provozních nákladů tvoří velmi čisté plyny (99,995 %),

Excimerové lasery

Excimer Type	Wavelength (nm)	Maximum Pulse Energy (mJ)	Maximum Average Power (W)
F ₂	157	50	20
ArF	193	600	100
KrF	248	1200	300
XeCl	308	1000	300
XeF	351	400	80

LASER	WAVELENGTH	PHOTON ENERGY	INTERACTION
CO ₂	10.6 μm	0.12 eV	Thermal
Nd:YAG	1.06 μm	1.20 eV	Thermal
Nd:YAG 2nd	532 nm	2.40 eV	Thermal
Excimer XeF	351 nm	3.62 eV	Photochemical
Excimer XeCl	308 nm	4.13 eV	Photochemical
Excimer KrF	248 nm	5.13 eV	Photochemical
Excimer ArF	193 nm	6.59 eV	Photochemical
Excimer F ₂	157 nm	8.10 eV	Photochemical

MOLECULE	BOND ENERGY
C—H	3.5 eV
O—H	4.5 eV
H—H	4.6 eV
O—O	5.1 eV
C—C	6.2 eV
N—O	6.5 eV
C—N	7.9 eV

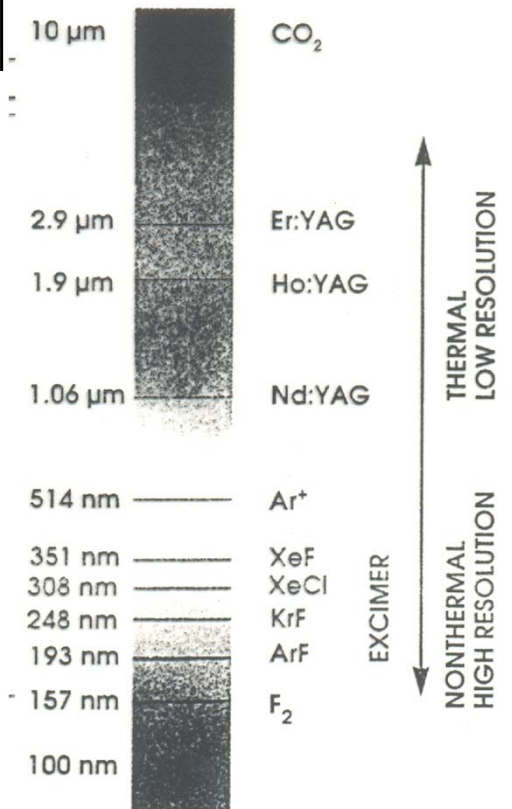
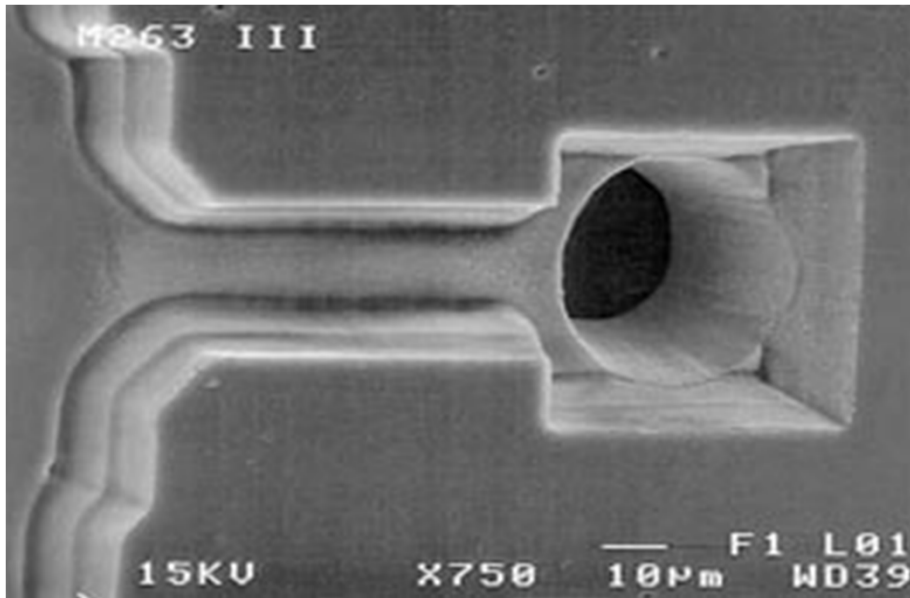
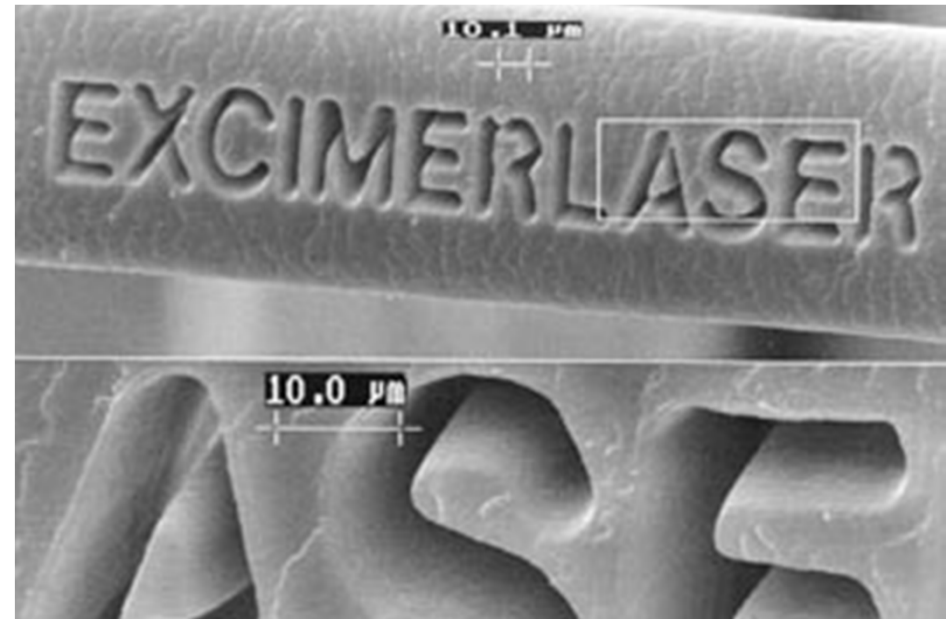


Figure 1. Spectrum of different laser sources. Excimer lasers fall within the ultraviolet spectral region.

Excimerové lasery - aplikace



Excimer lasers are critical tools used in the manufacture of the majority of inkjet printers. This micrograph shows a single nozzle hole with a flow channel. Image courtesy of Lexmark.



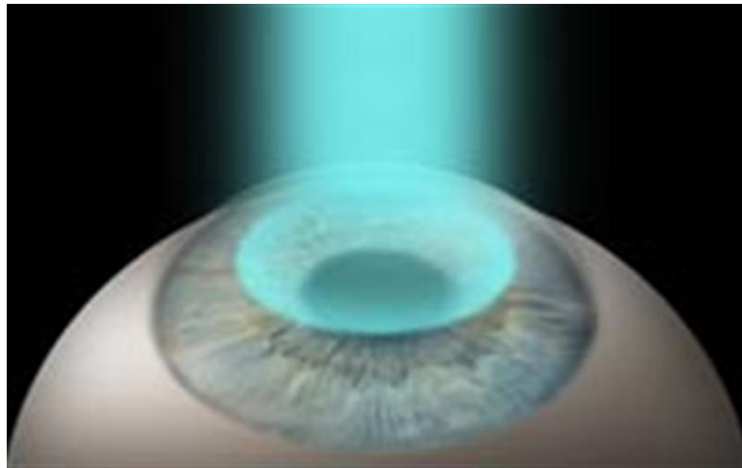
Ablated hair

- mikroobrábění (vrtání mikroděr (20-200 μm) do hlav tryskových tiskáren, mikroděr do integrovaných obvodů- pro díry o průměru menším než 10 μm je levnější než mechanické).
- vysoká energie fotonů (cca 3,5 až 7,9 eV) umožňuje rozbití většiny vazeb v organických materiálech (C=H vazba má vazebnou energii 3,5 eV). Tento proces přímého rozbití vazby se jmenuje fotoablace, narozdíl od NdYAG nebo CO₂ laserů, které materiál odpařují tepelně.

Excimerové lasery- korekce očních vad

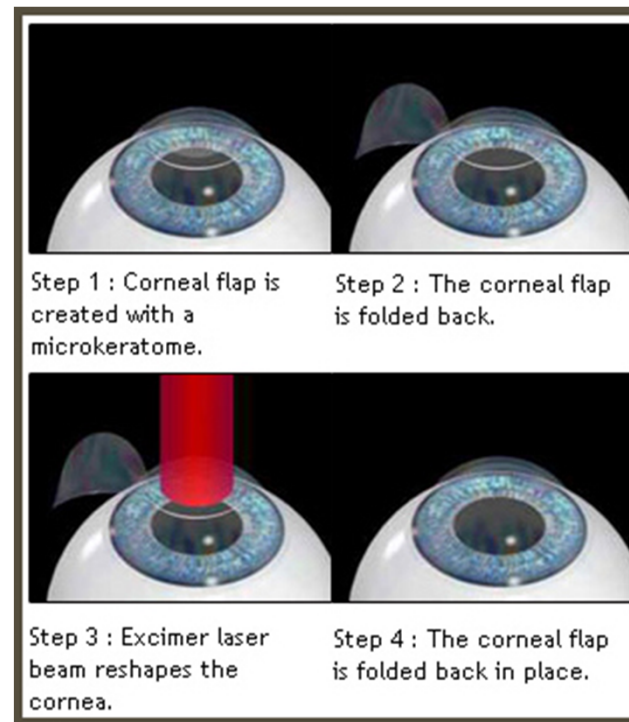
PRK (Photorefractive Keratectomy)

PRK reshapes the front surface of the cornea *without* first creating a flap. In this case, the protective superficial layer of the cornea is not preserved and it will require several days to repair. For most patients, this means significantly more pain and a longer recovery time until clear vision is achieved. However, since no flap is created, there is no potential for a flap complication in PRK.

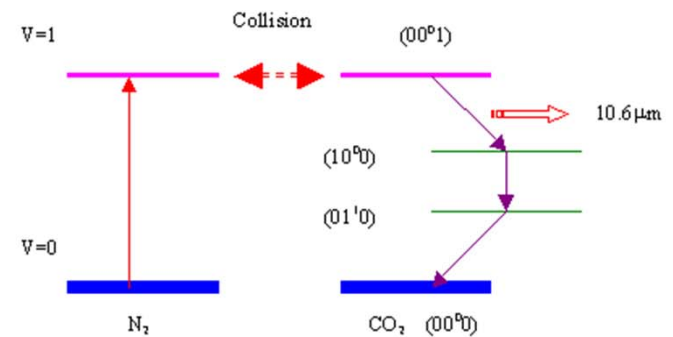
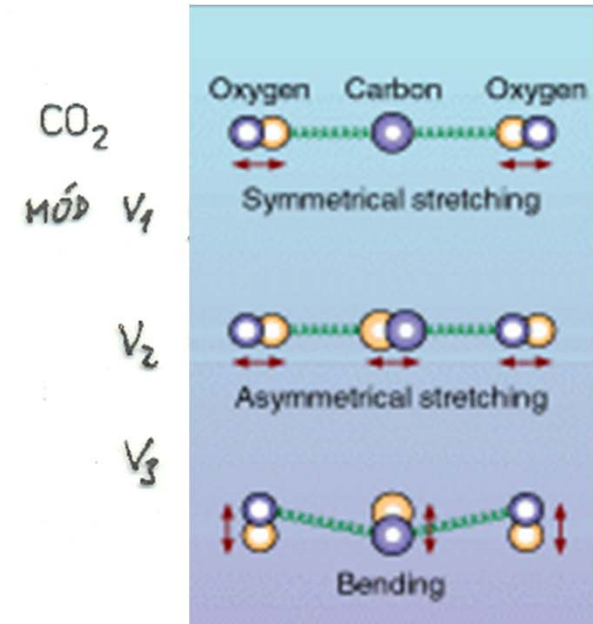
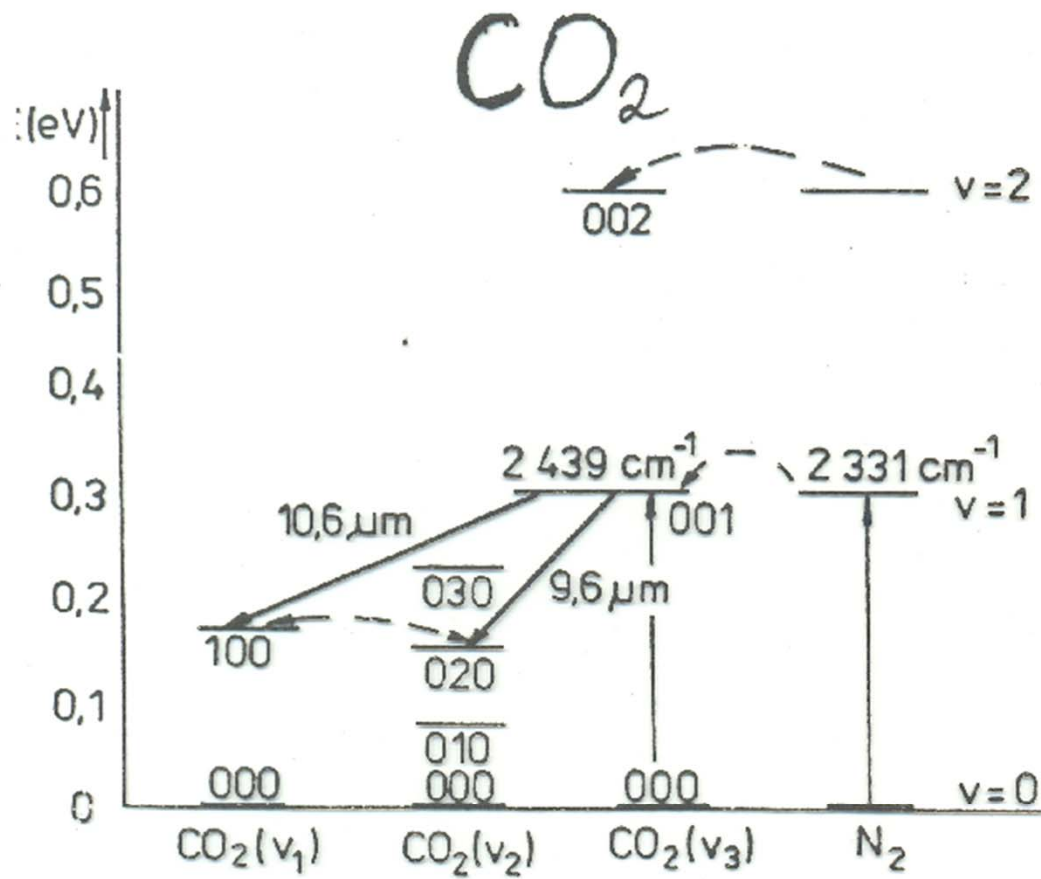


LASIK (Laser Assisted In-Situ Keratomileusis)

LASIK is a surgical procedure that utilizes the excimer laser to re-shape the cornea, but it also uses a micro-keratome or an additional laser to create a flap on the front of the cornea. The flap is lifted and the excimer laser energy is applied to the cornea behind the flap. This laser energy is delivered in a precise manner to reshape the cornea to correct the refractive error in each eye. Once the excimer laser has finished reshaping the middle layer of the cornea, the flap is placed back in its original position. LASIK generally results in less pain and faster vision recovery than PRK.



CO₂ lasery



CO₂ lasery

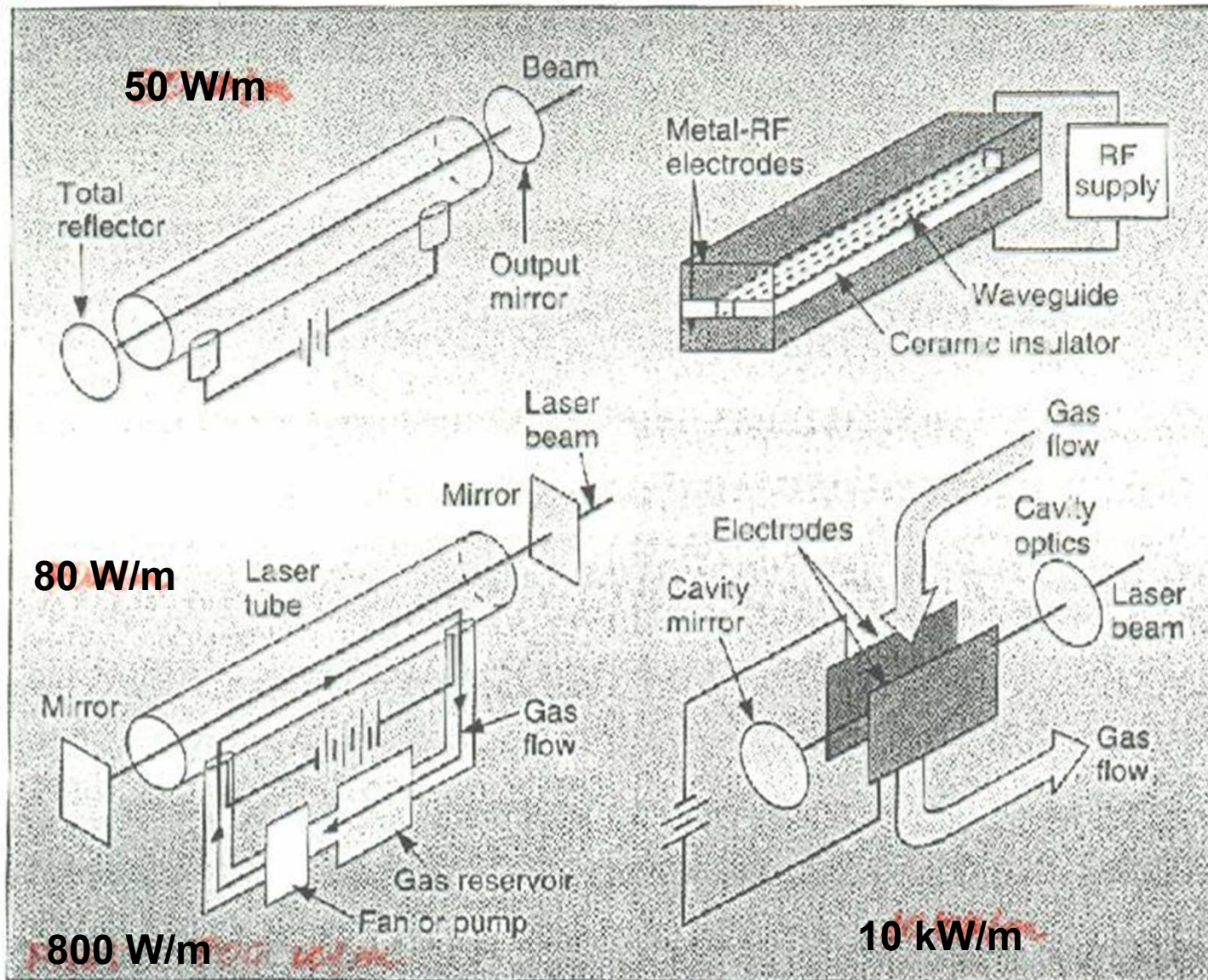
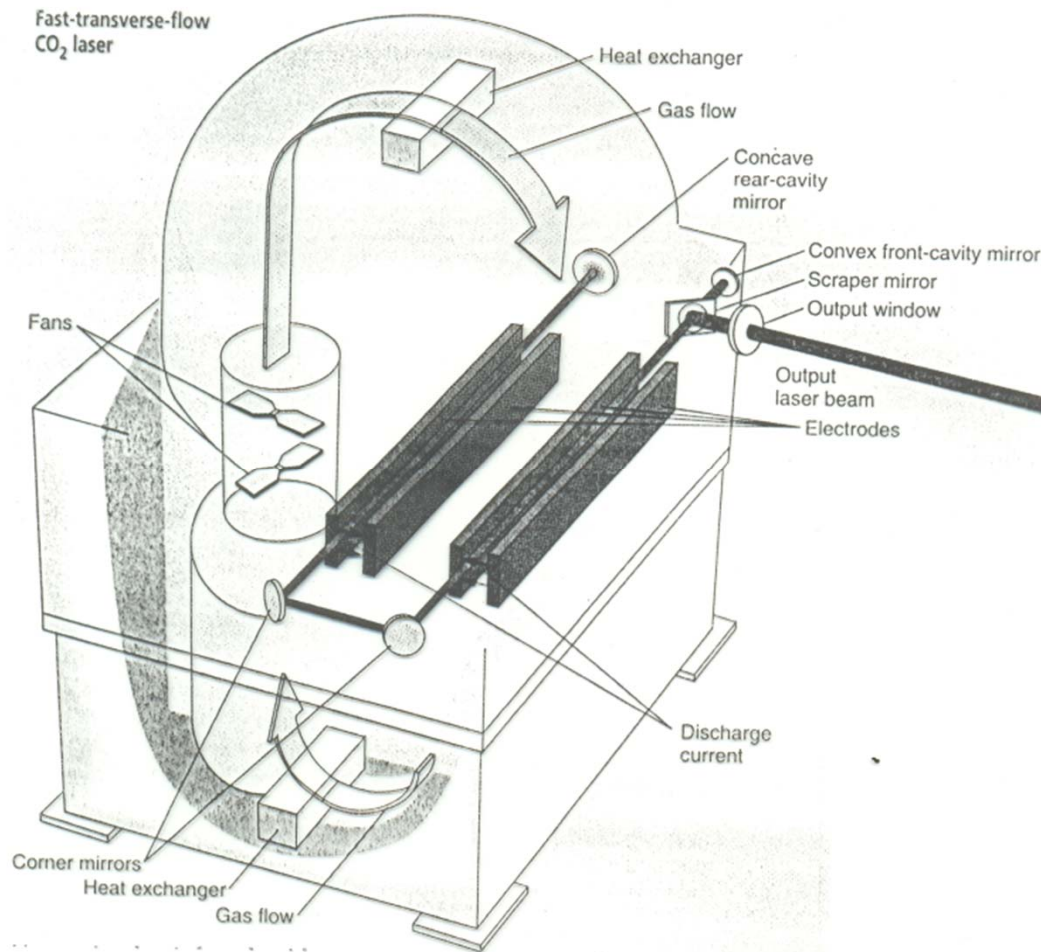


FIGURE 3.11. CO₂ LASER CONFIGURATIONS

CO₂ lasery



Aplikace: obrábění, kalení, řezání (např. i titanu), vrtání, tvorba plasmatu z malých terčů, laserový radar nebo lidar (signály na 10 mikronech se zpracovávají podobně jako radarové), spektroskopie atmosféry, nekrvavá chirurgie (zataví vlasečnice)

Kapalinové (barvivové) lasery

- Laserujícím prostředím je látka, která je za pokojové teploty kapalná.
- Tyto lasery jsou opticky čerpány buď jiným laserem (Argonový, Nd:YAG, na Cu-parách, excimerový) nebo výbojkou.
- Nejúspěšnějšími kapalinami jsou organická barviva rozpuštěná v kapalných rozpouštědlech (metanol, zředěná voda...).
- CW nebo pulsní režim, díky velmi široké křivce zisku až ps a fs pulsy. Doba života elektronů na horní hladině je jen ns a tak je potřeba velké intenzity čerpacího záření k nastolení laserování (buď velké výkony čerpacích svazků nebo jejich ostrá fokusace)
- Spektrálně se klenou od UV po infra oblast (300nm - 1300nm), ale s použitím několika barviv (všechna by měla mít největší absorpci na vlnové délce použitého budícího laseru). Tyto lasery mají spektrálně velmi široké křivky zisku (jedno barvivo ale maximálně 80nm), umožňující širokou přeladitelnost. Způsobeno to je množstvím vibračních a rotačních hladin, které umožňují téměř kontinuální přeladování frekvence.
- Problémem je životnost barviv (klesá jejich účinnost, zejména při UV čerpání) od několika tisíců Watthodin po pouhé Watthodiny. Většina barviv a rozpouštědel je karcinogenních a toxických.

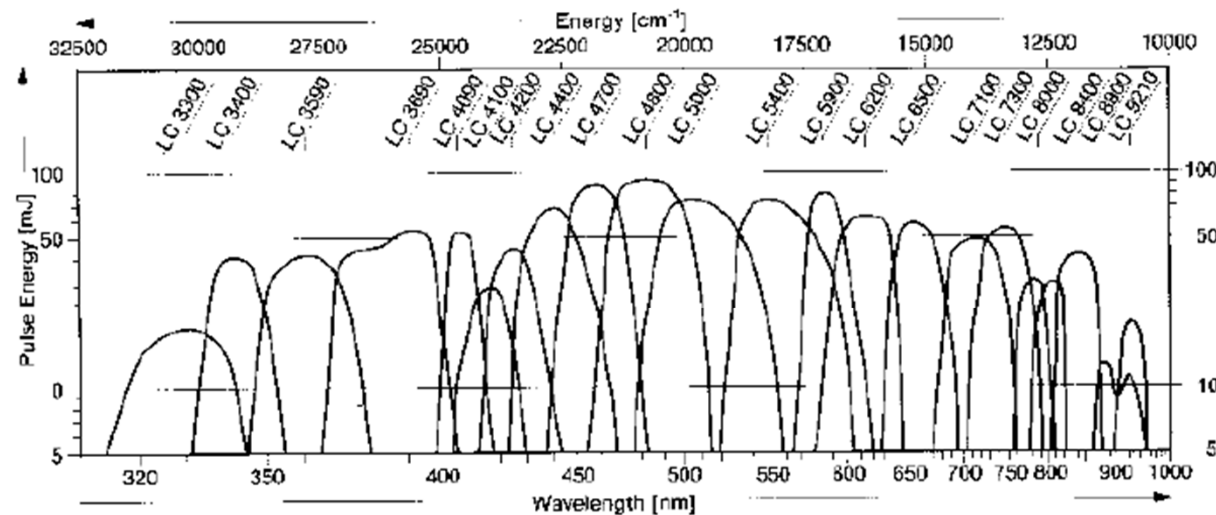


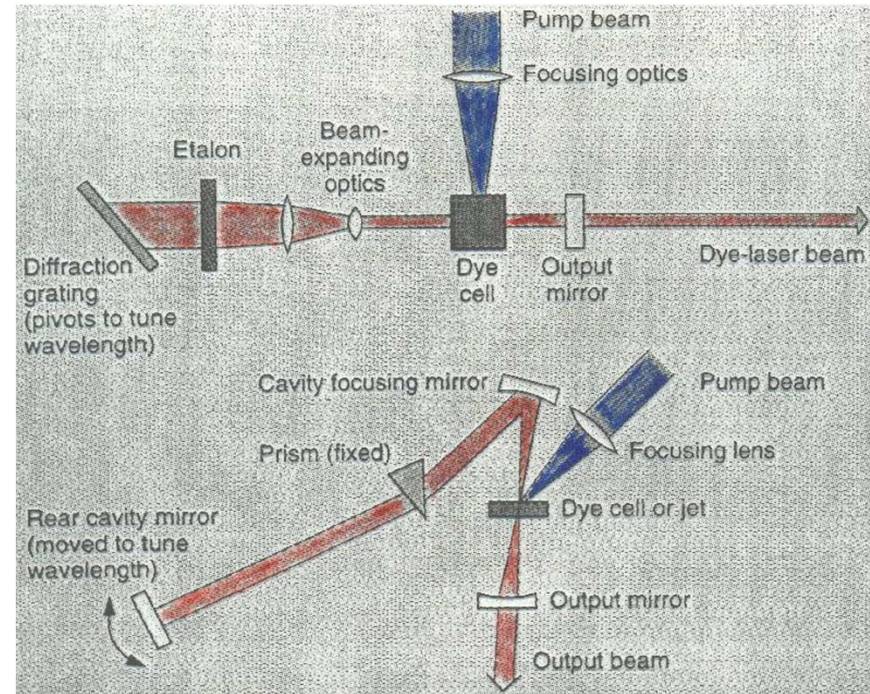
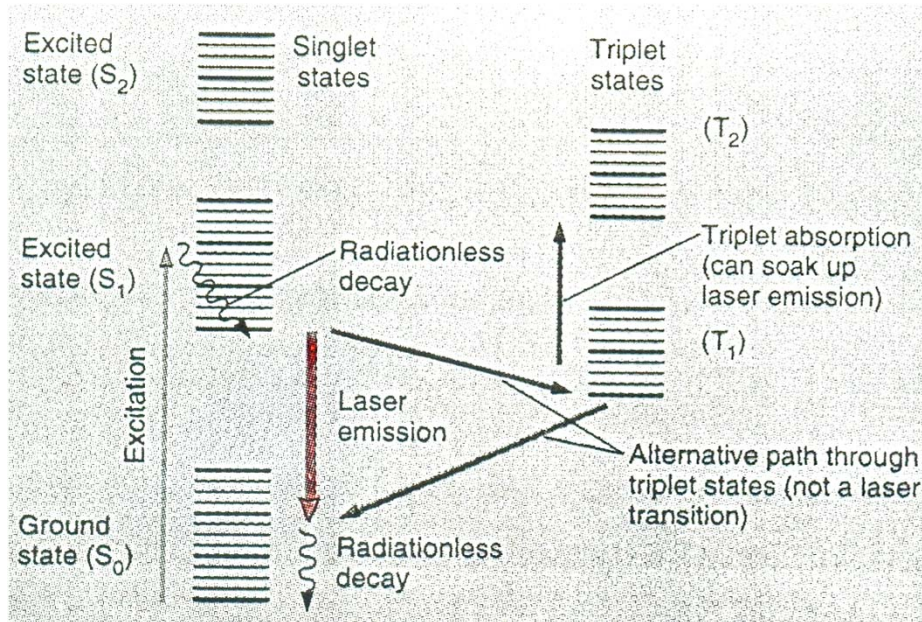
Figure 1.

Tuning range of dyes for excimer-pumped dye lasers.

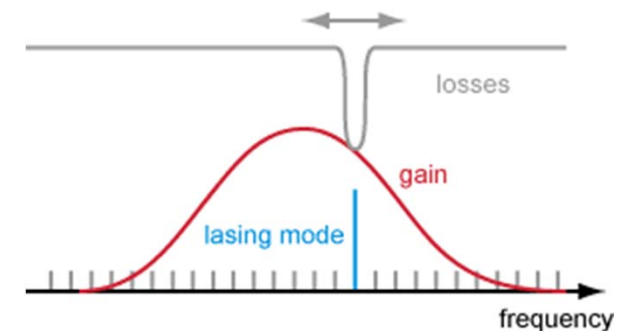
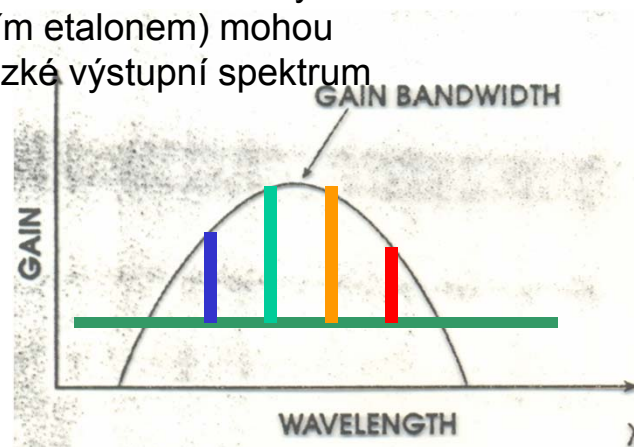
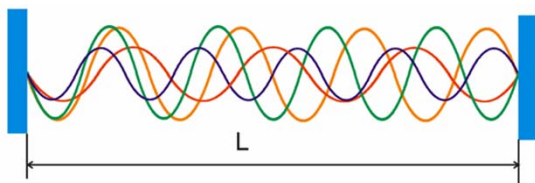
Kapalinové (barvivové) lasery

Barvivo	vl. délky [nm]	čerpání	Barvivo	vl. délky [nm]	čerpání
Polyphenyl 2	~383	Pulsy UV - Ar	Rhodamin 6G	546-592	Nd:YAG 532
Stilbene 1	~415	UV Ar		562-625	Výbojka
Stilbene 3	408-453	Dusíkový		563-607	Cu 511nm
(Stilbene 420)	410-454	XeCl		566-610	XeCl
	412-444	Nd:YAG 335		568-605	Dusíkový
	414-465	UV Ar		573-640	Ar 455-514
Coumarin 102	~477	Kr 407-415	Dicyano methylen	598-677	Cu 511
Coumarin 480	454-510	UV Ar		600-677	Výbojka
	457-520	Výbojky		600-695	Dusíkový
	457-517	XeCl		607-676	Nd:YAG 532
	459-508	Nd:YAG 335	Styryl 9	775-865	Nd:YAG 532
	453-495	Dusíkový		784-900	Ar
Rhodamin 110	529-585	Ar 455-514		810-860	Výbojka
	530-580	Výbojka	IR barv. 140	866-882	Nd:YAG 532
	541-583	Nd:YAG 532		875-1015	Kr 753-799
	542-578	XeCl		876-912	XeCl

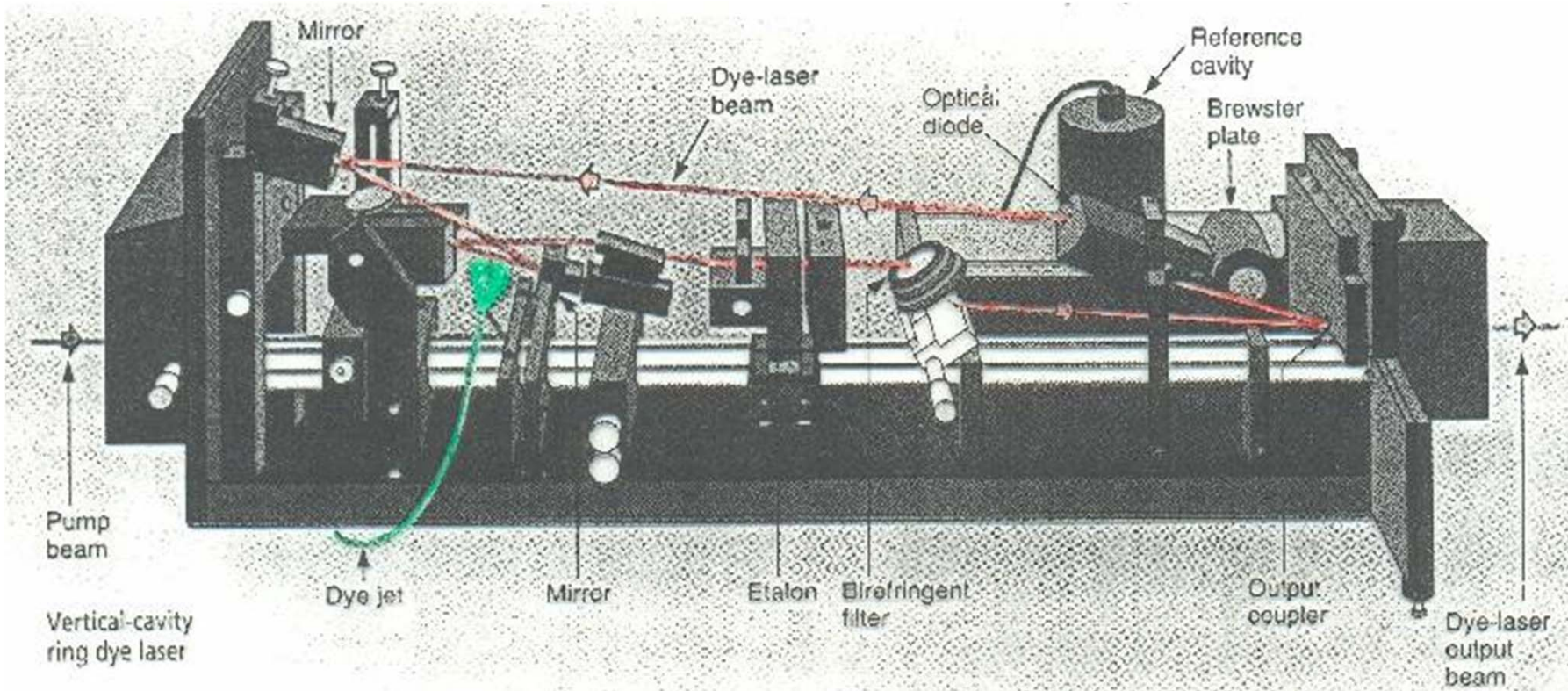
Kapalinové (barvivové) lasery



➤ Příslušná vlnová délka se "naladí" vlnově selektivním rezonátorem s hranolem nebo difrakční mřížkou. Díky vnějšímu rezonátoru (např s vnitřním etalonem) mohou mít v kontinuálním provozu velmi úzké výstupní spektrum záření (pouze jeden podélný mod).



Kapalinové (barvivové) lasery



Kapalinové (barvivové) lasery

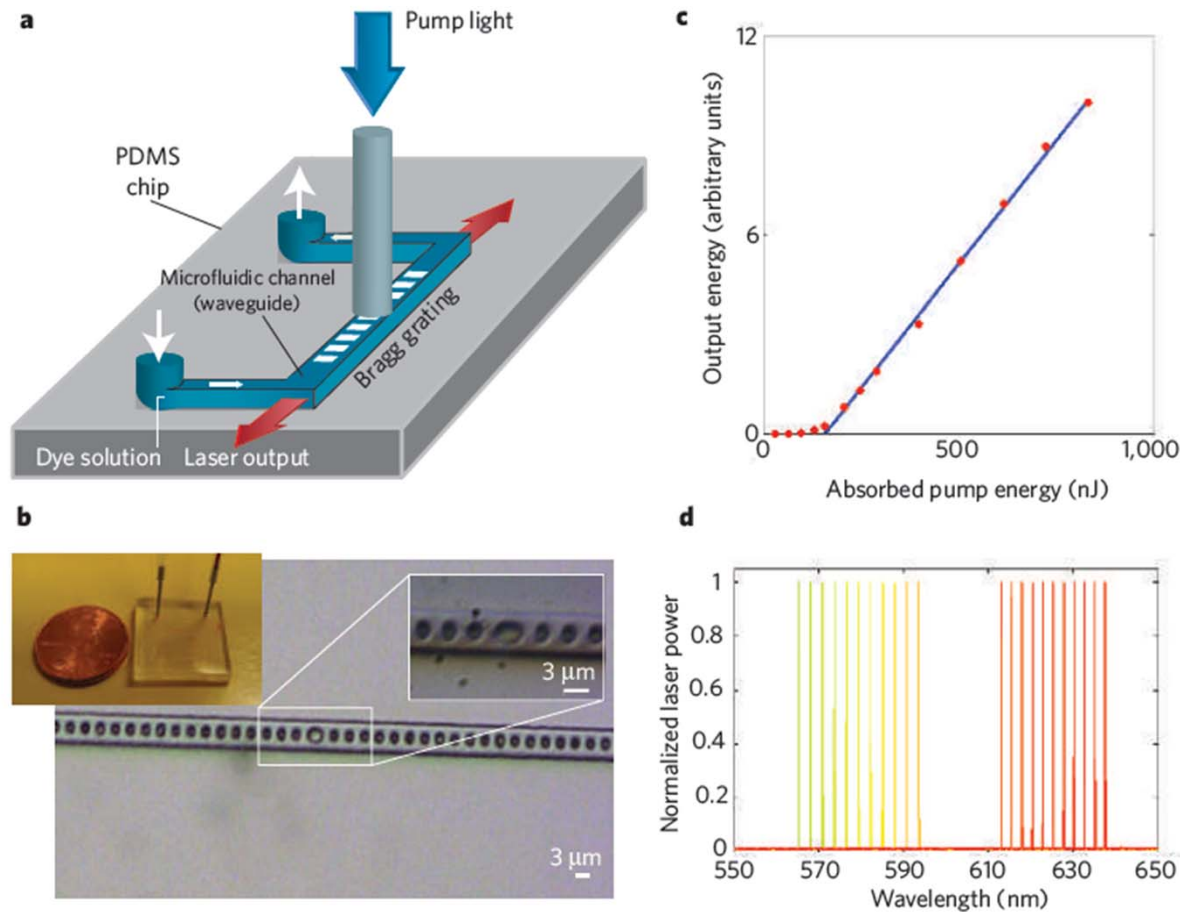
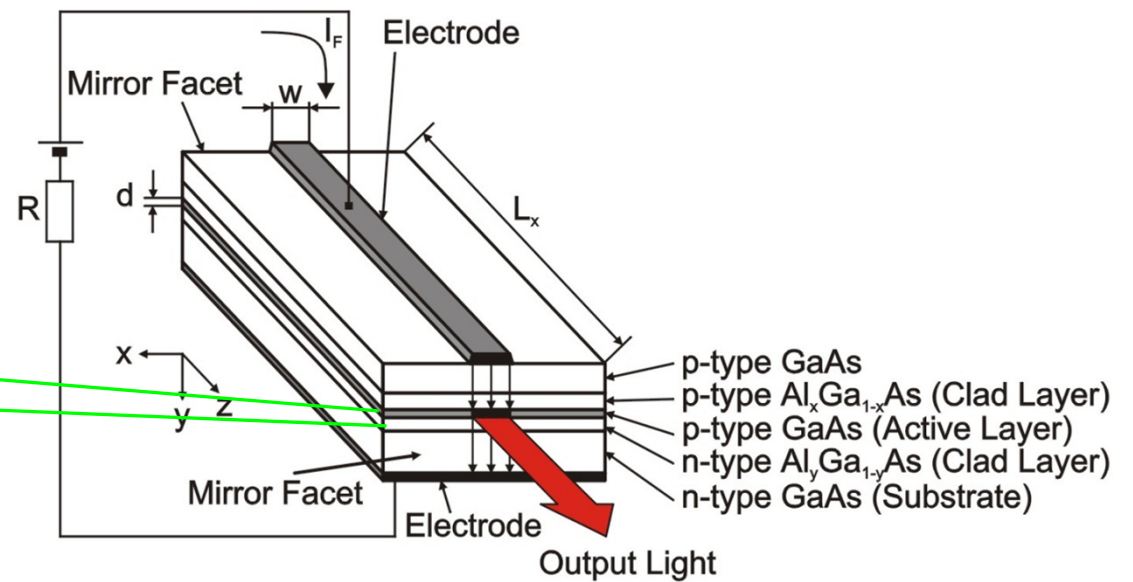
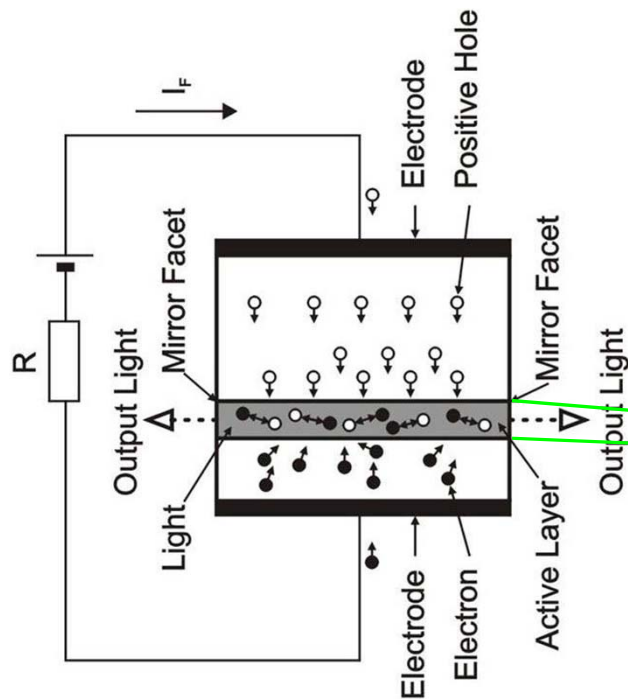
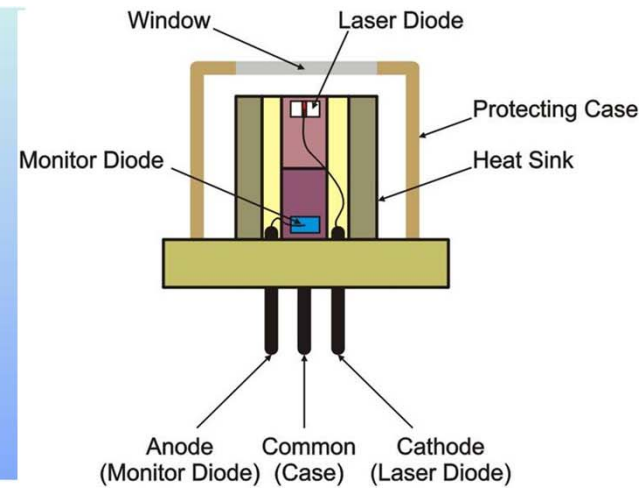
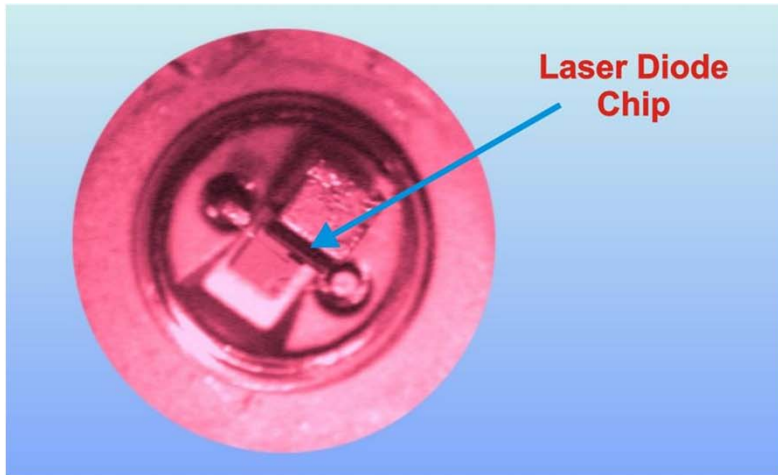


Figure 4 | An optofluidic distributed feedback (DFB) dye laser. **a**, A schematic of the laser. A microfluidic channel with a distributed feedback Bragg grating structure is fabricated in PDMS. A dye solution, which acts as both the core of the optical waveguide and the gain medium, can be introduced into the structure through the channel. An excitation pump light field is incident on the laser structure. **b**, An optical micrograph of the DFB structure. The laser's wavelength may be tuned by changing the dye choice or by stretching/compressing the flexible PDMS to change the periodicity of the DFB structure. Insert shows a device next to a penny to indicate its small size. **c**, Experimental data demonstrating the threshold characteristic of the laser. **d**, Demonstration of ~60 nm tuning range for the laser that can be achieved by mechanically deforming the structure and changing the dye choice (yellow, Rhodamine 6G dye; red, Rhodamine 101 dye).

D. Psaltis Nature 2006

Polovodičové lasery – laserové diody



Polovodičové lasery – laserové diody

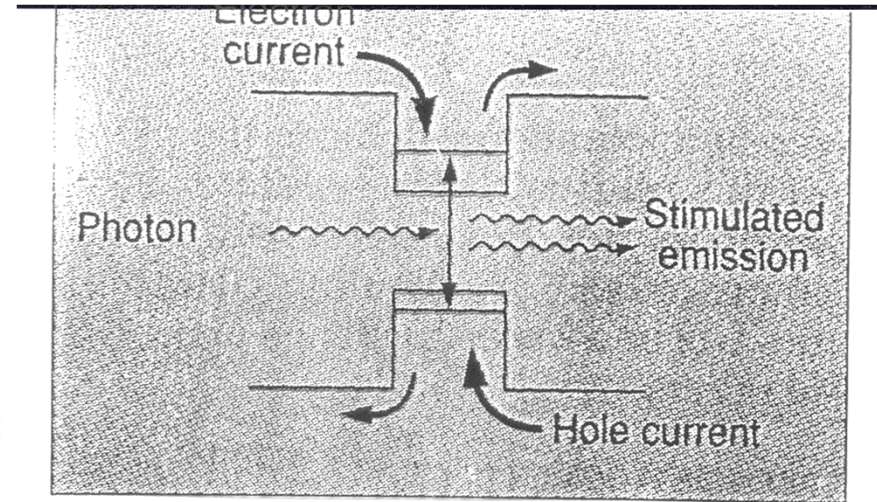
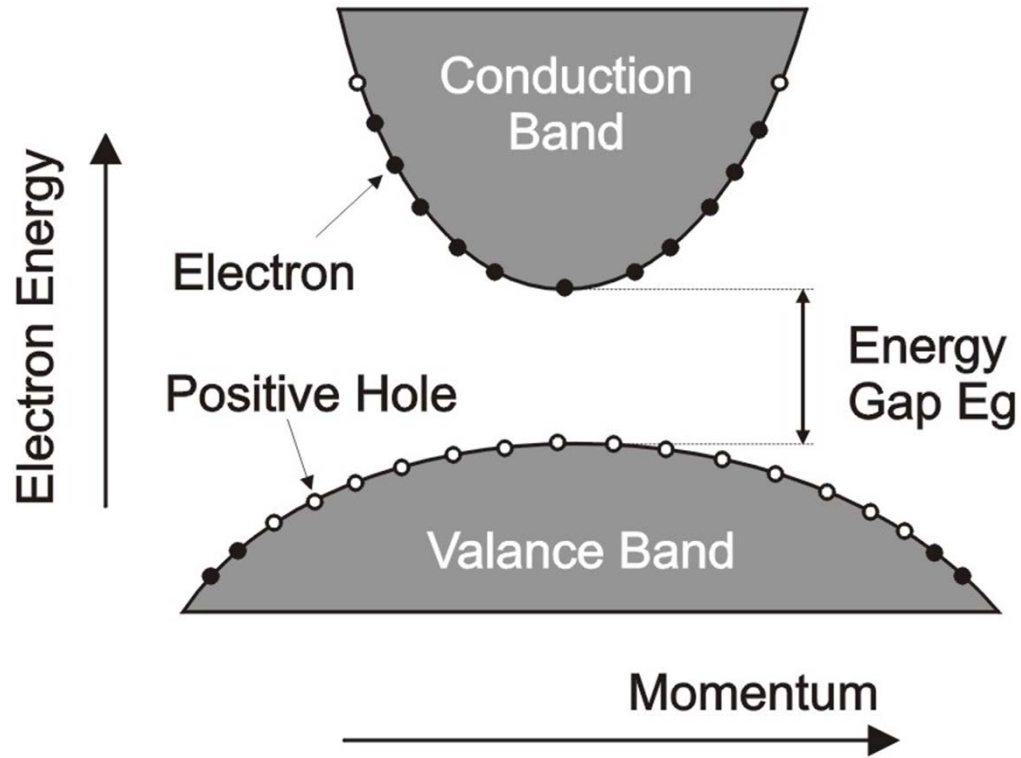
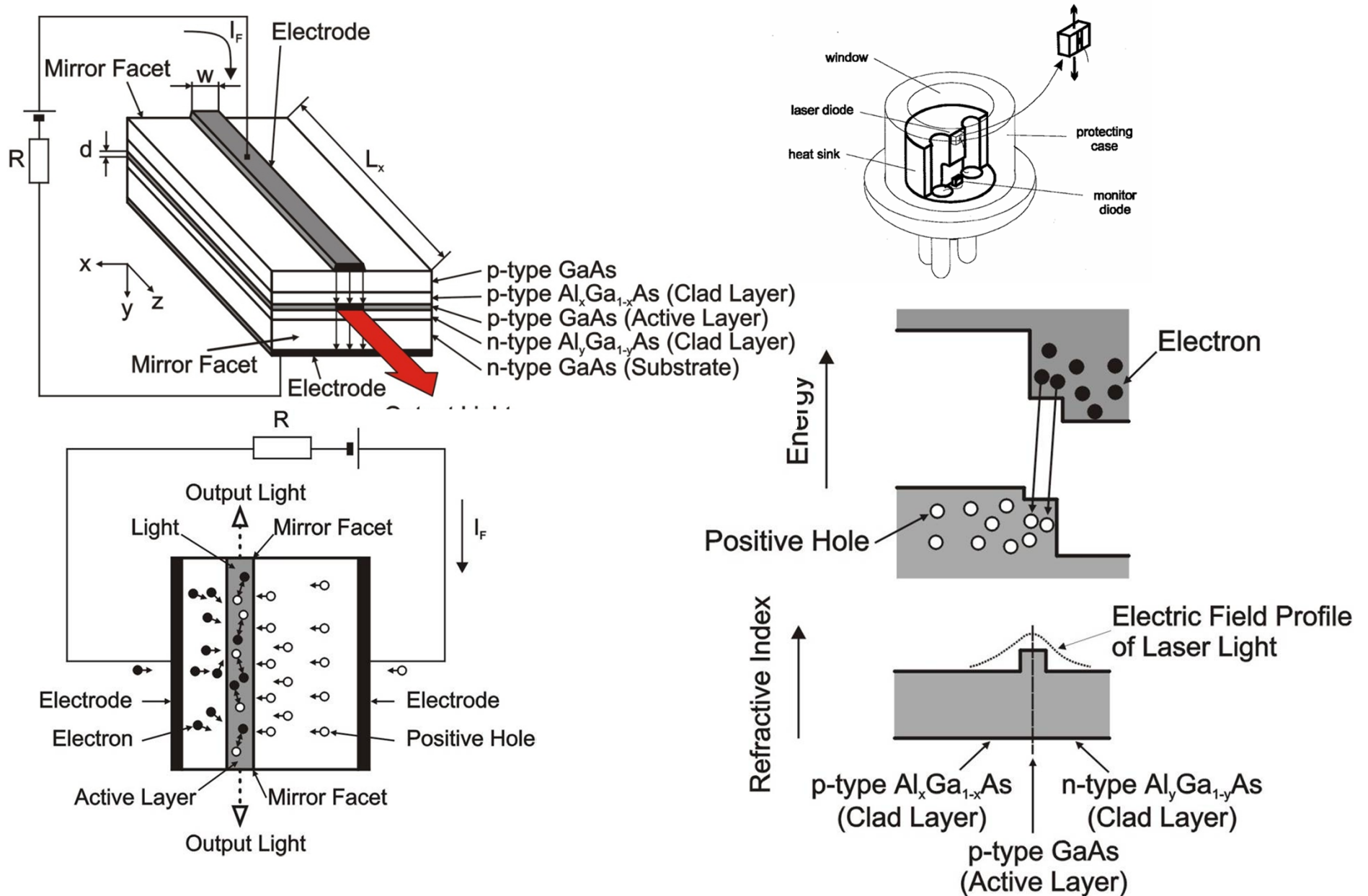


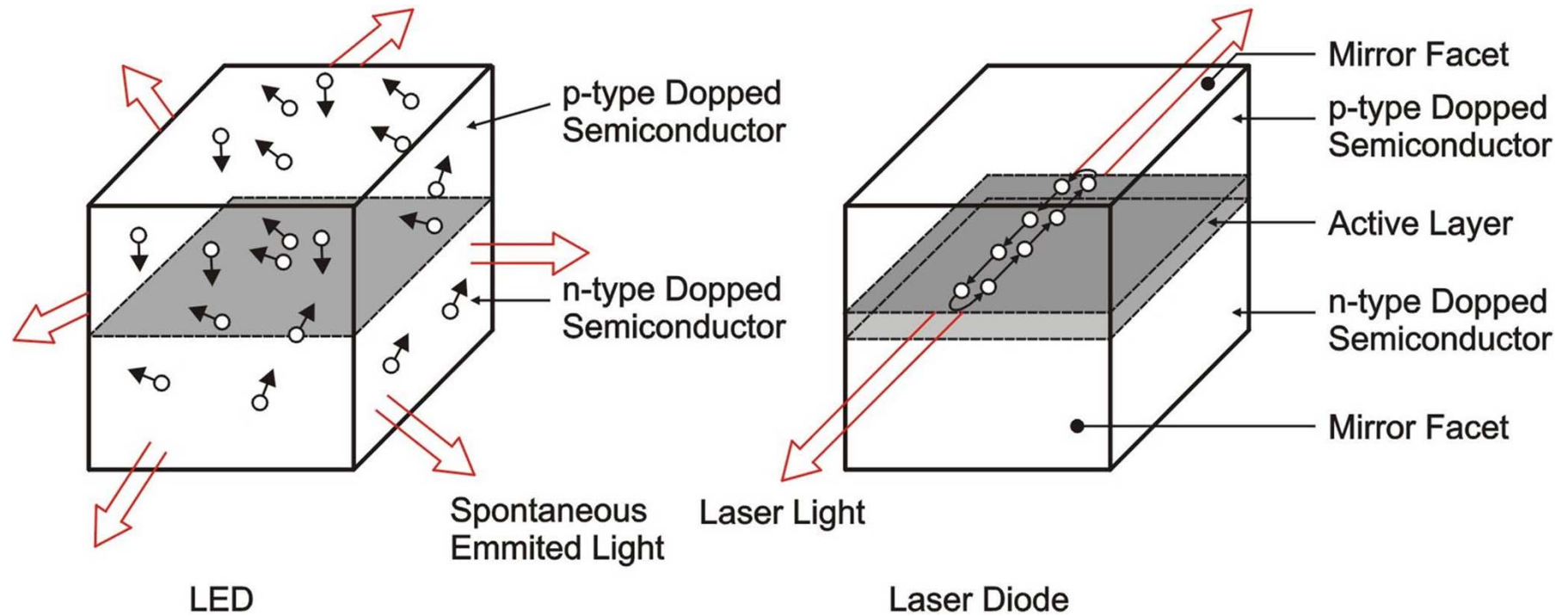
FIGURE 4. Stimulated emission happens after electrons and holes injected from cladding layers are recombined between energy states of the potential wells. Some of the carriers (thin arrows) escape to the SCH region without contributing to the process.

Illustration of the cavity structure of a semiconductor laser:

(a) the 3-D view, (b) the 2-D cross-sectional view in y-z plane.



Nekoherentní (LED Dioda) a koherentní (laserová dioda) zdroj



Basic double-heterostructure towards gain-guided, index-guided, distributed feedback DFB, and distributed Bragg reflector DBR

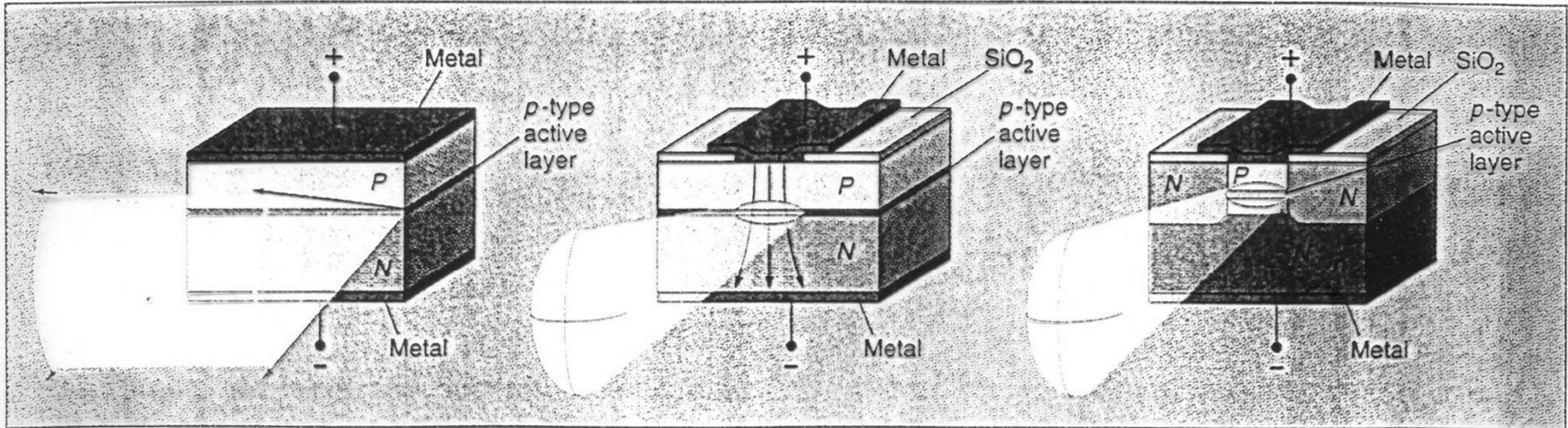
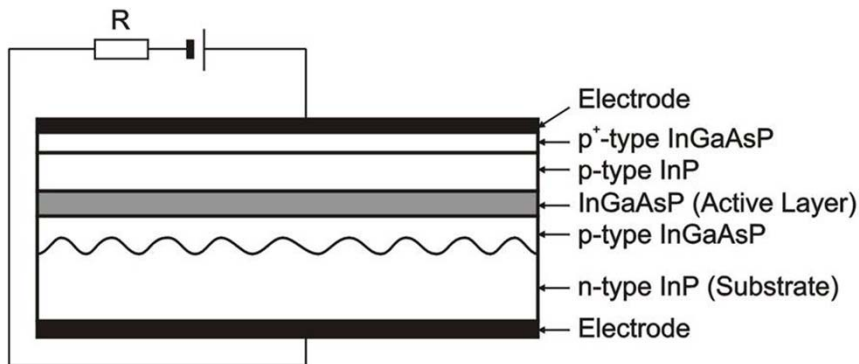
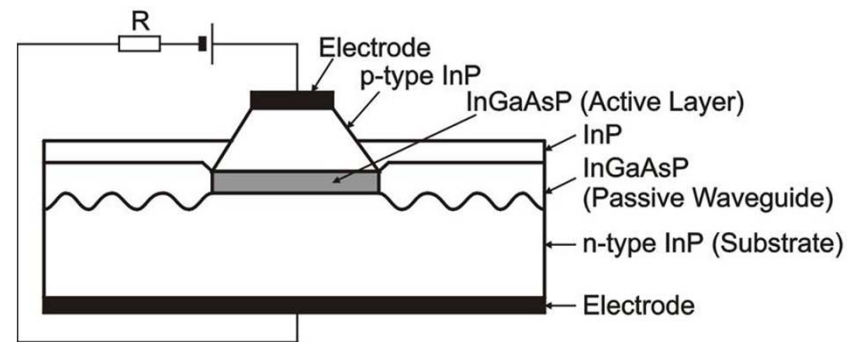


FIGURE 2. The basic double-heterostructure architecture (left) comes in two stripe geometries: gain-guided (middle) and index-guided (right). Wide-band-gap *p*- and *n*-type semiconductor materials are signified by P and N, respectively. Notice the narrow current flow (arrows) through the gain-guided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

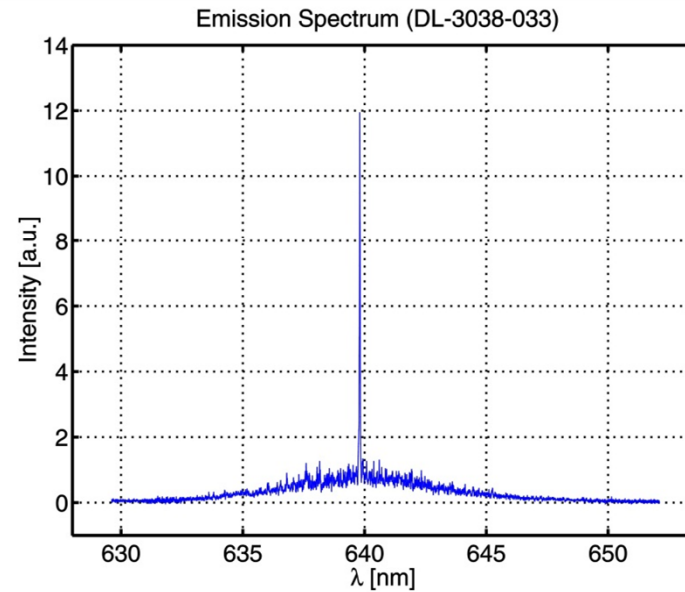
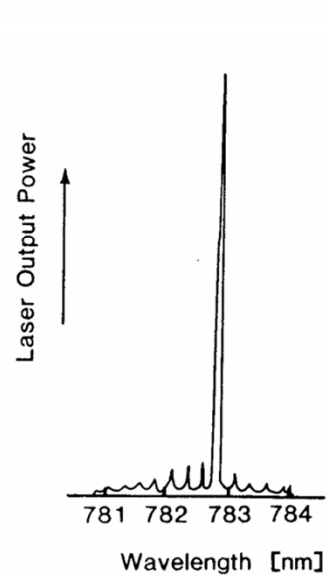
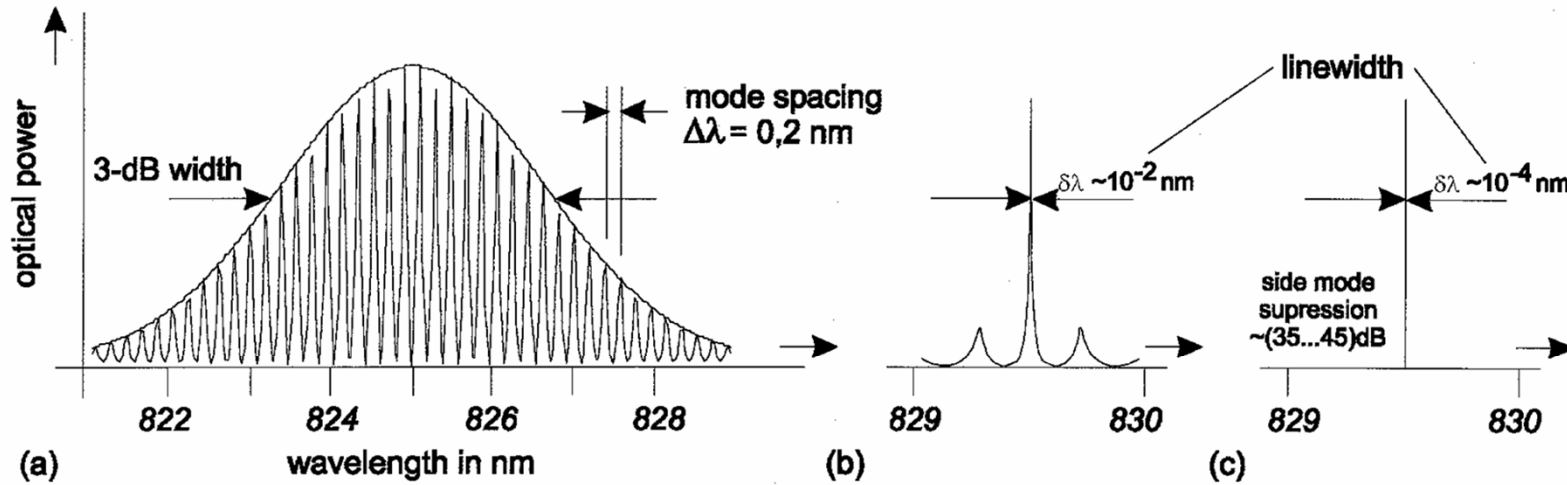


DFB



DBR

Gain spectral profiles of gain-guided and index-guided laser diodes



Quantum Well structure of laser diodes

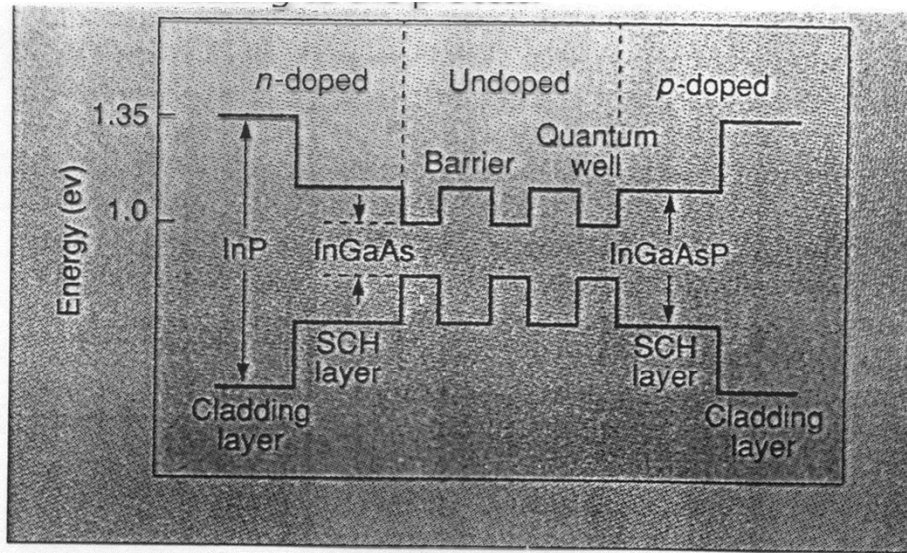


FIGURE 3. Light waves are transversely guided between two cladding layers laterally either by changes in the refractive index (index guiding) as in a ridge waveguide laser or by current injection along a longitudinal stripe contact (gain guiding) as in broad-area lasers. The addition of SCH layers provides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

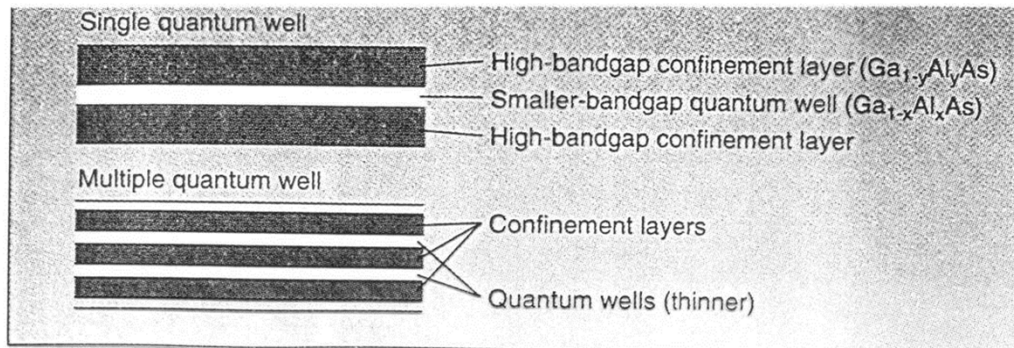
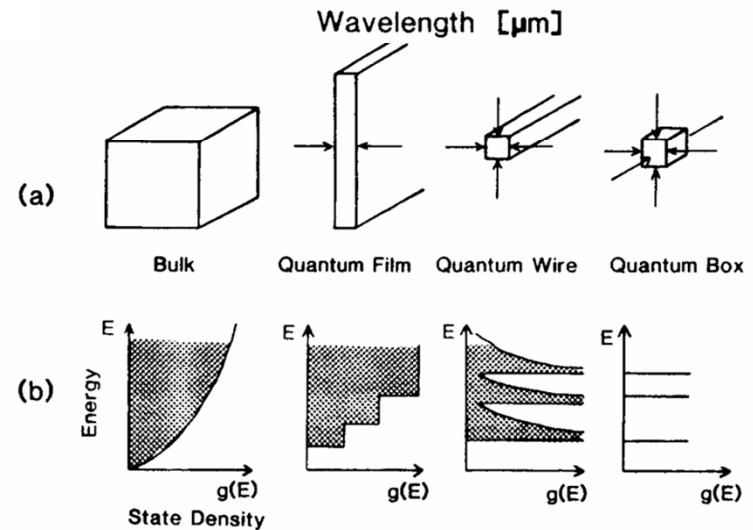
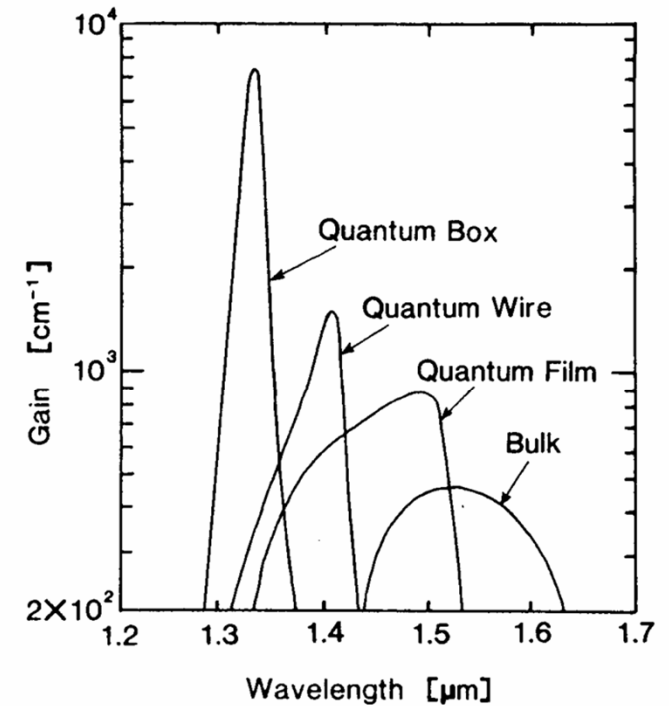
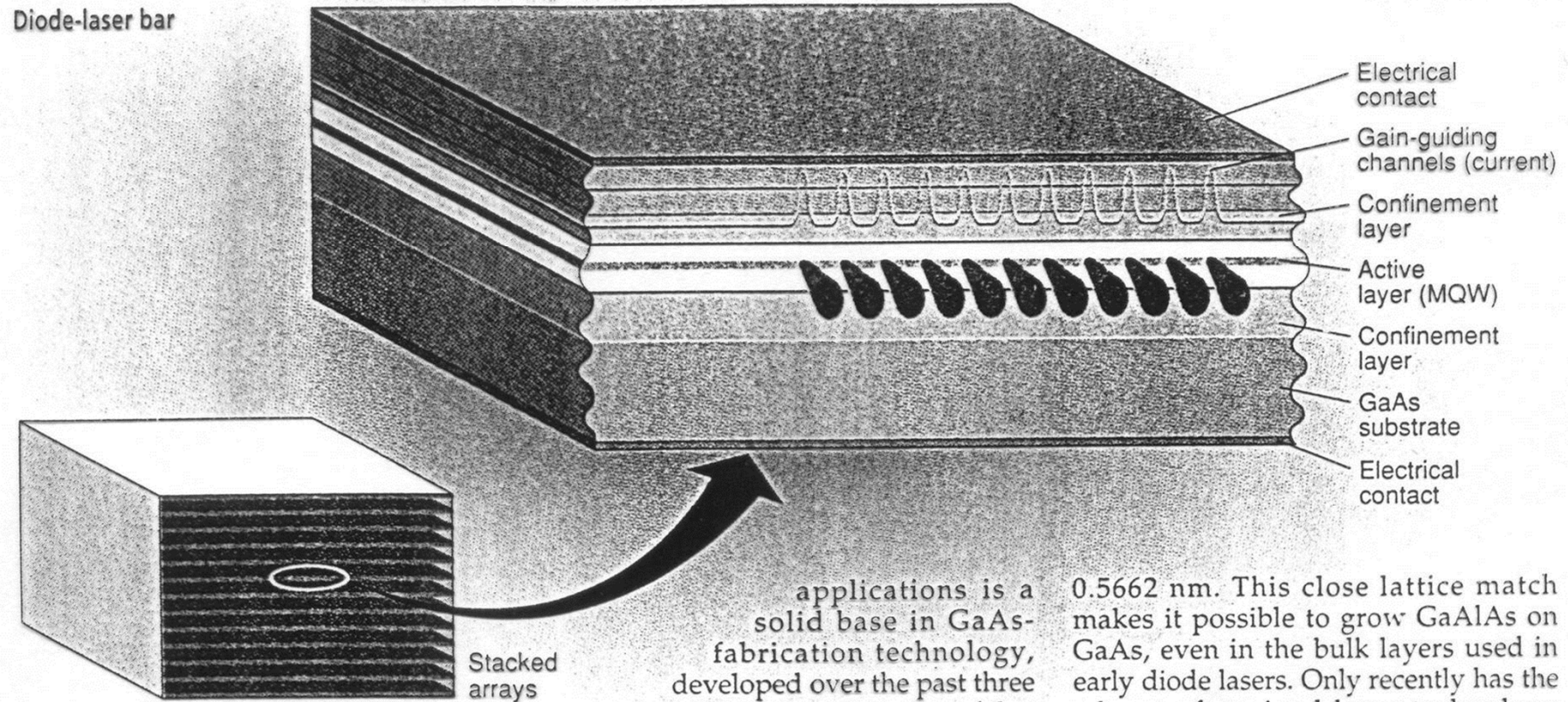


FIGURE 4. A single quantum well (top) is surrounded by thicker layers of higher-bandgap material. Multiple quantum wells also can be stacked in the active layer (bottom).



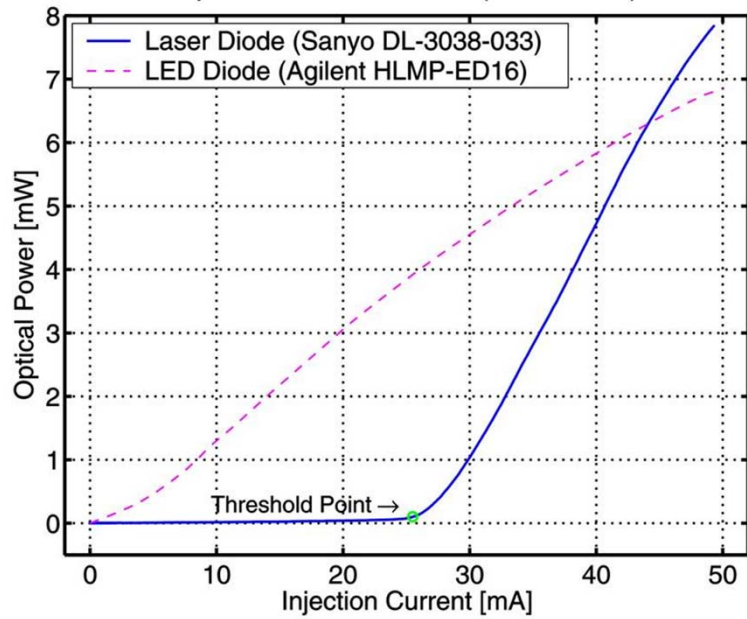
High-power laser diodes – diode laser bars and arrays



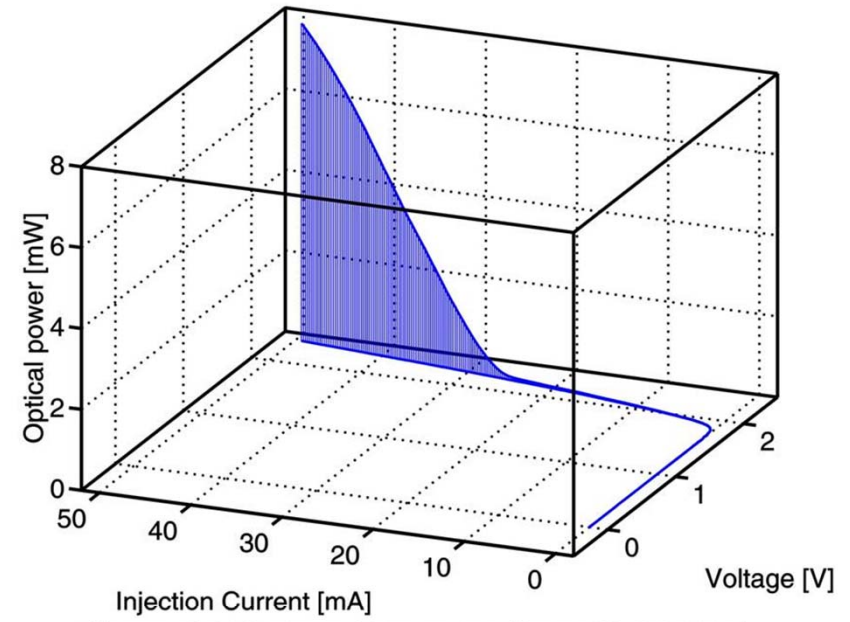
applications is a solid base in GaAs-fabrication technology, developed over the past three decades. The combination of that 0.5662 nm. This close lattice match makes it possible to grow GaAlAs on GaAs, even in the bulk layers used in early diode lasers. Only recently has the advent of strained-layer technology

Optical and electrical parameters of laser diodes I

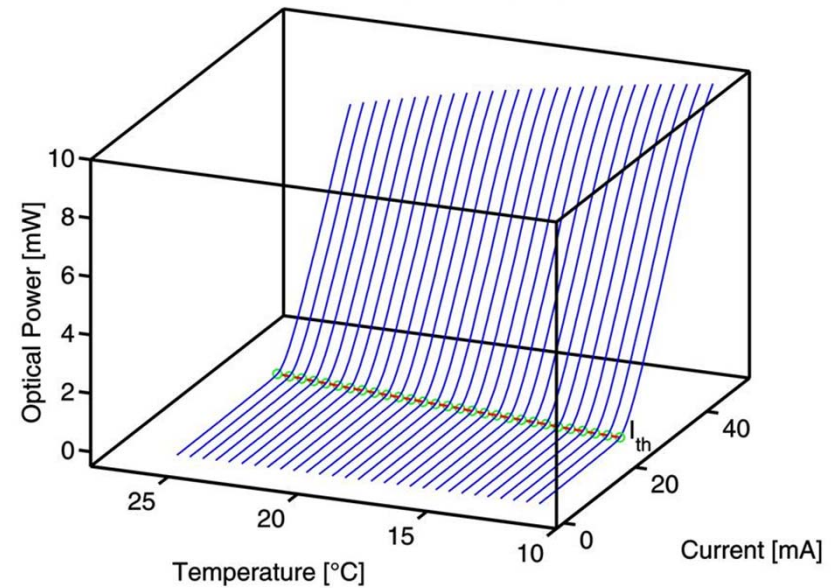
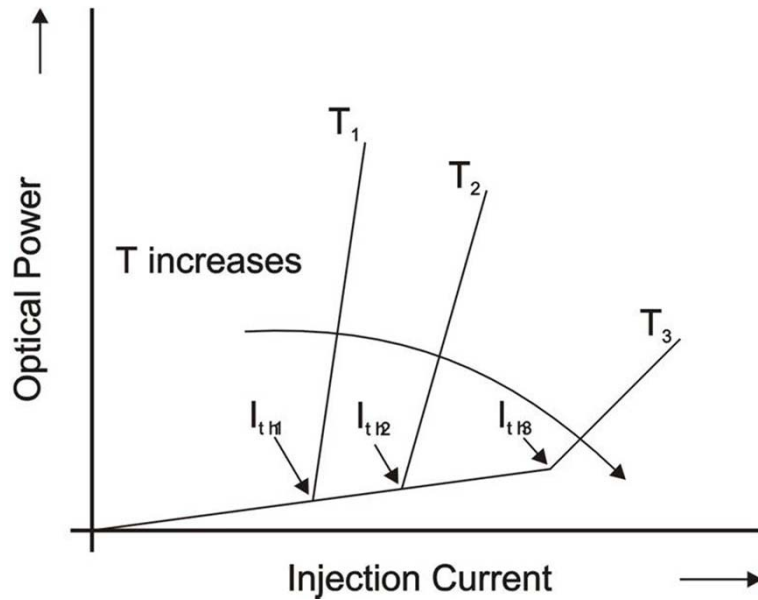
Optical Power vs. Current (LD and LED)



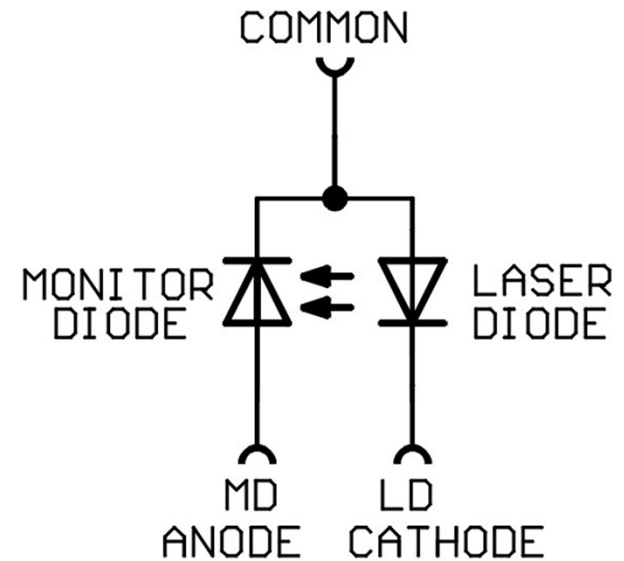
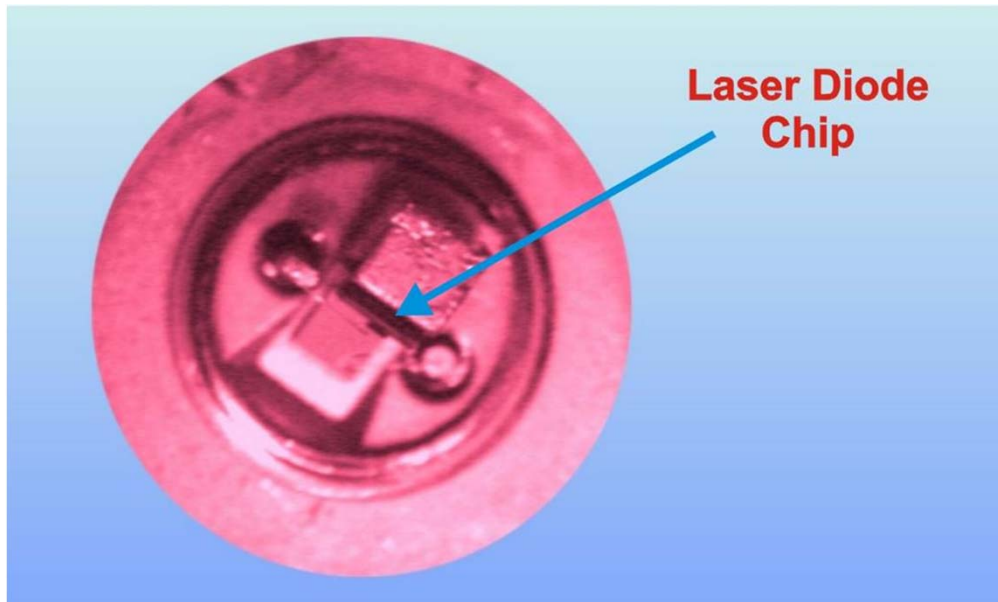
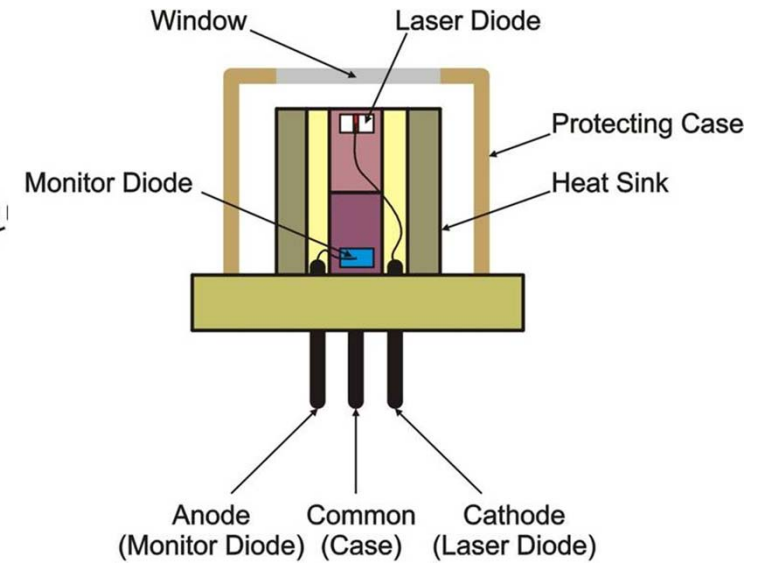
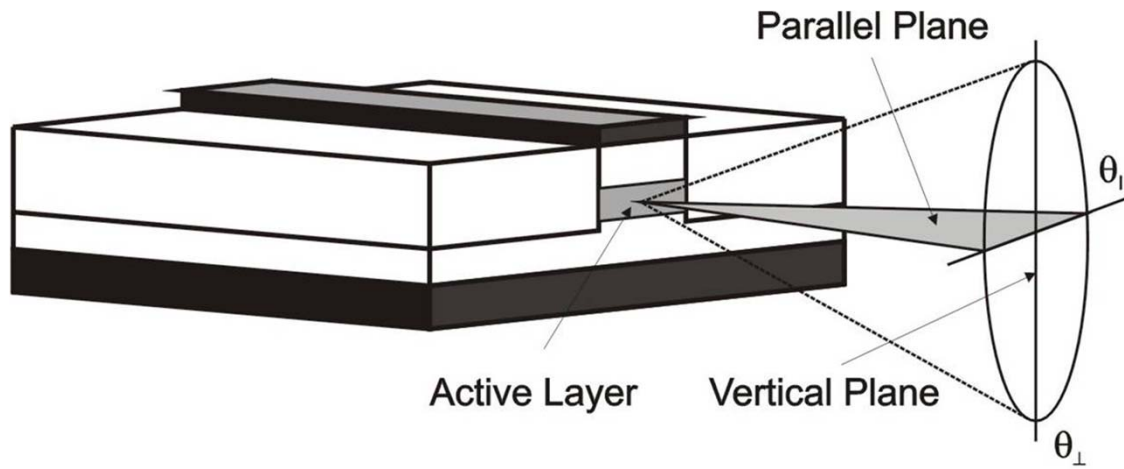
Optical Output Power (Sanyo DL-3038-033)



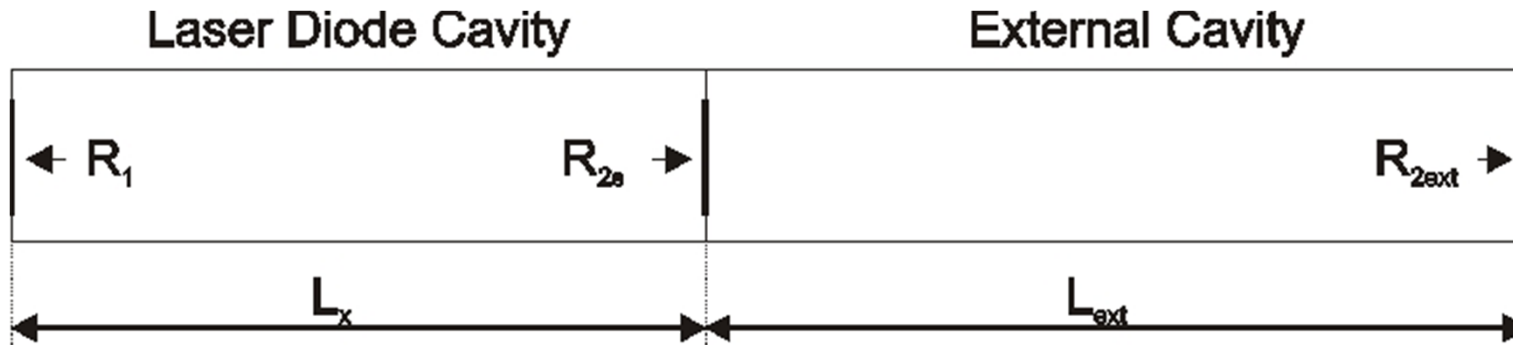
Characteristic Curve vs. Temperature (Sanyo DL-3038-033)



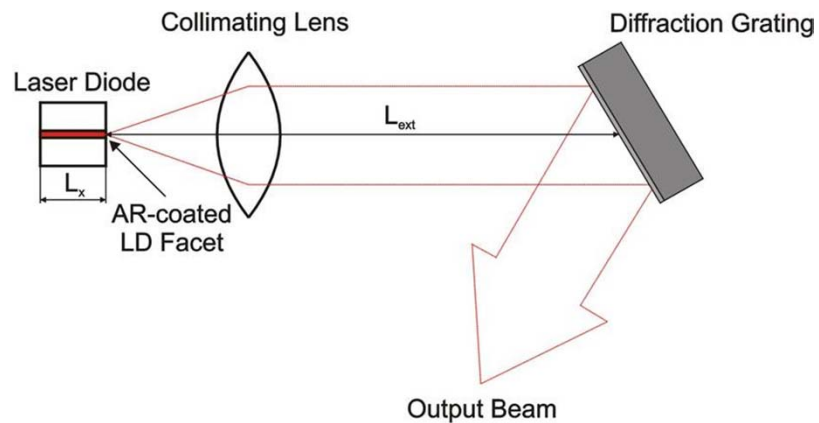
Optical and electrical parameters of laser diodes



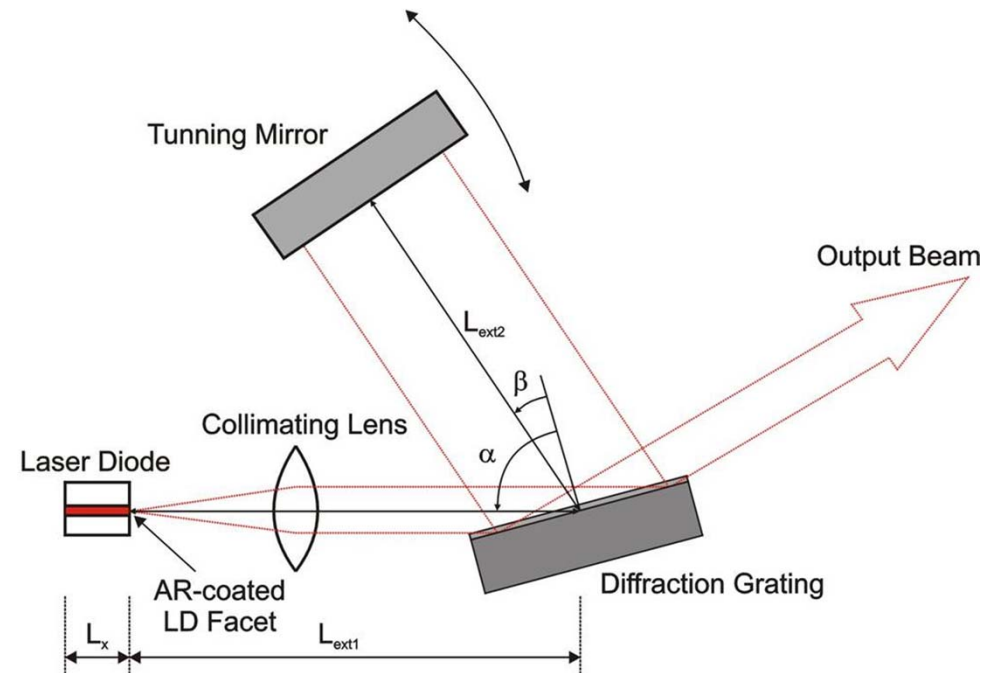
Extended Cavity Lasers – ECLs



Principle of operation

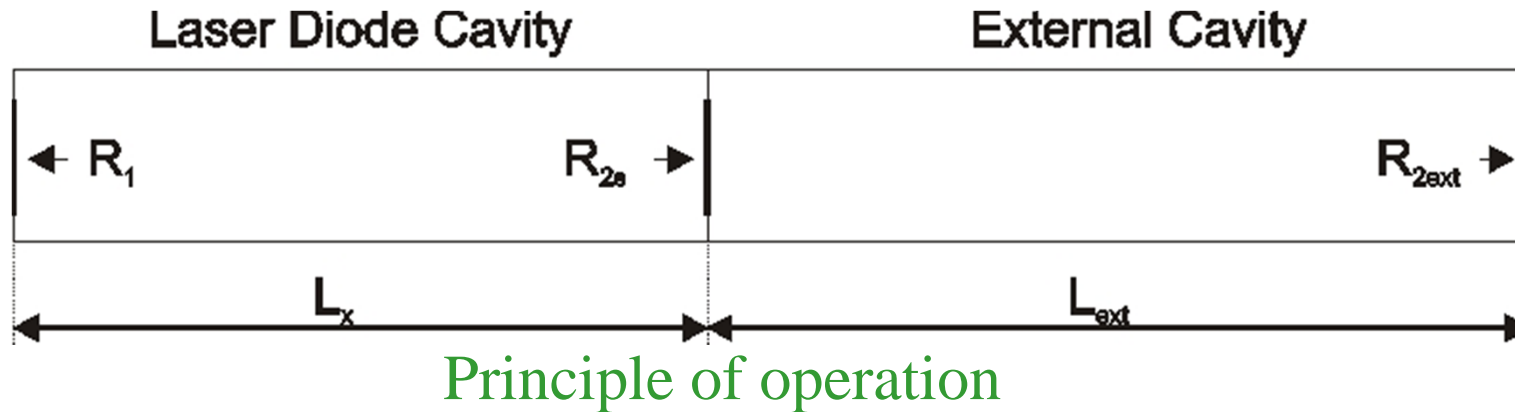


Littrow configuration

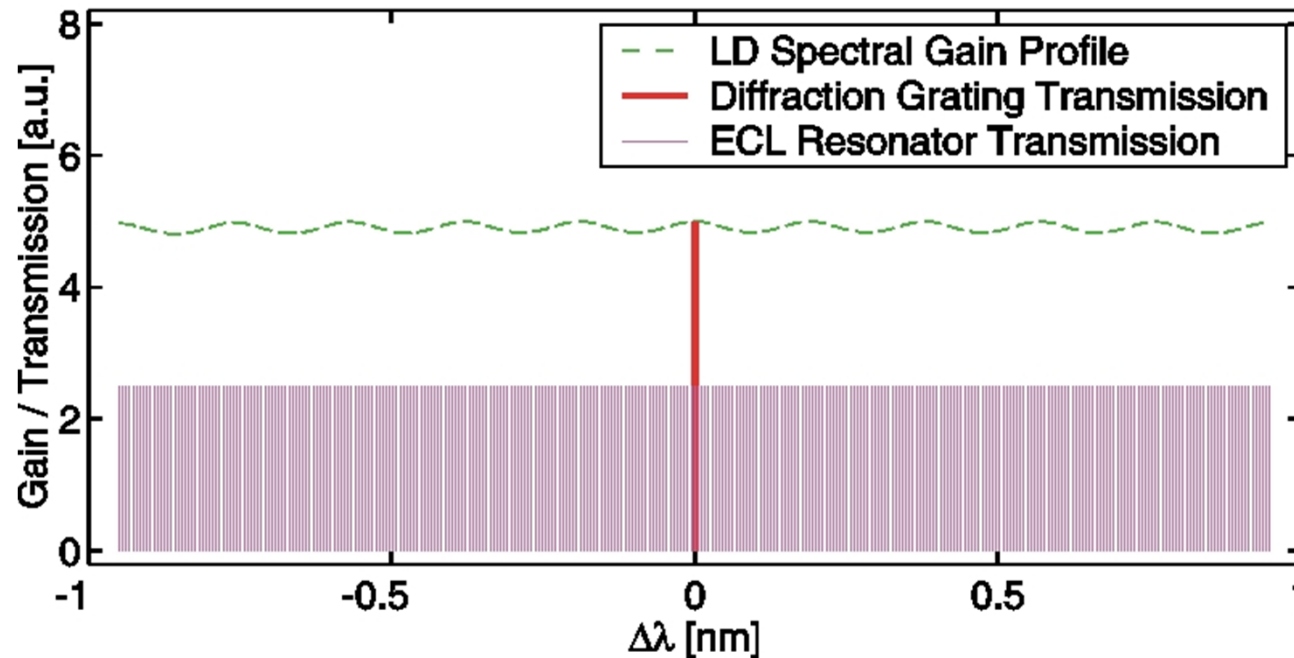


Littmann configuration

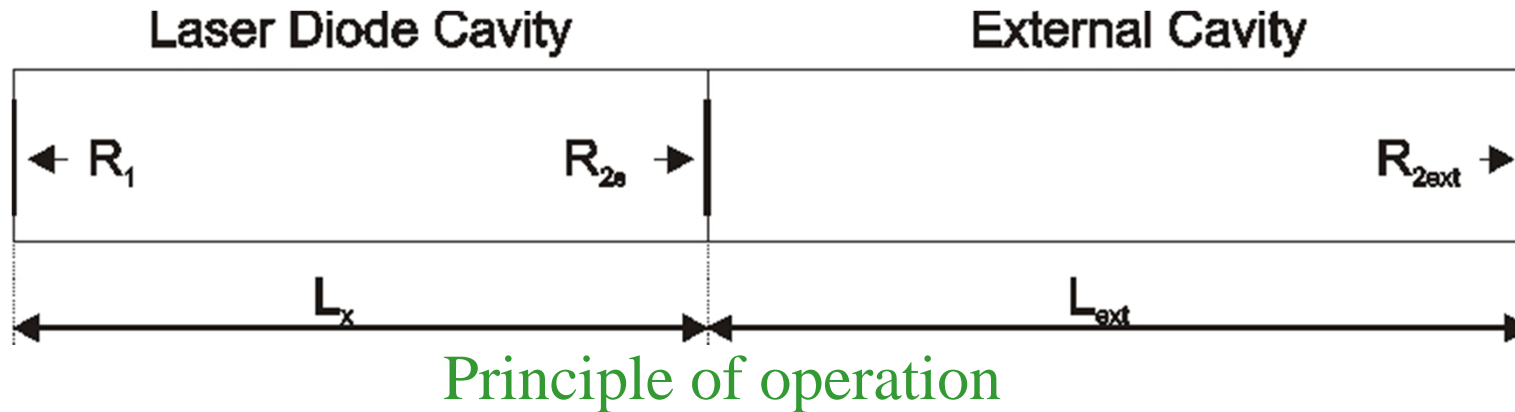
Extended Cavity Lasers – ECLs



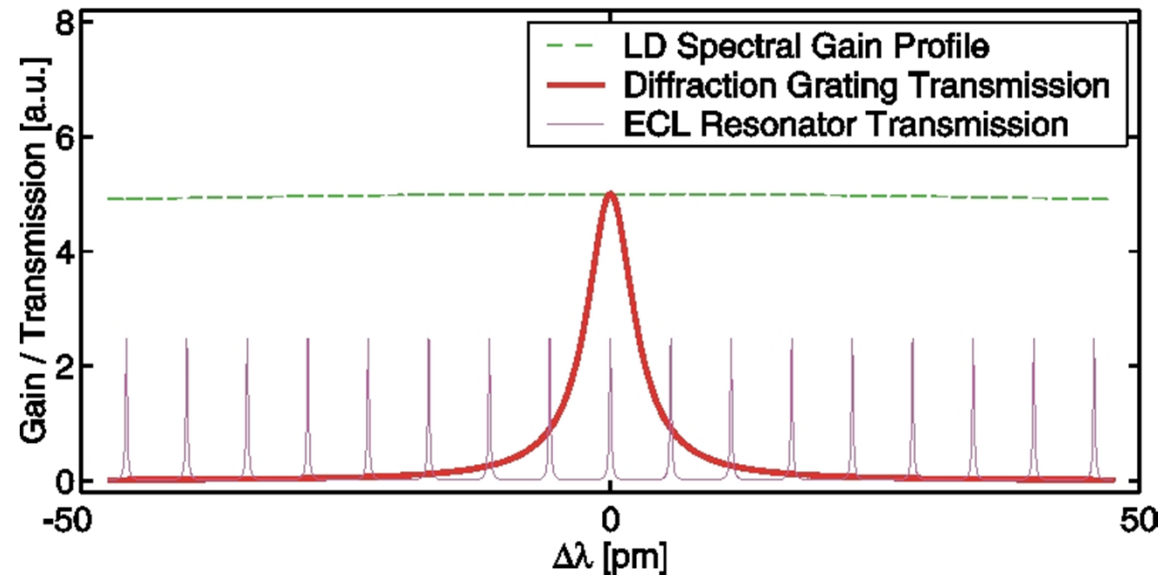
(a) Principle of Single-Mode Selection of ECL Laser



Extended Cavity Lasers – ECLs

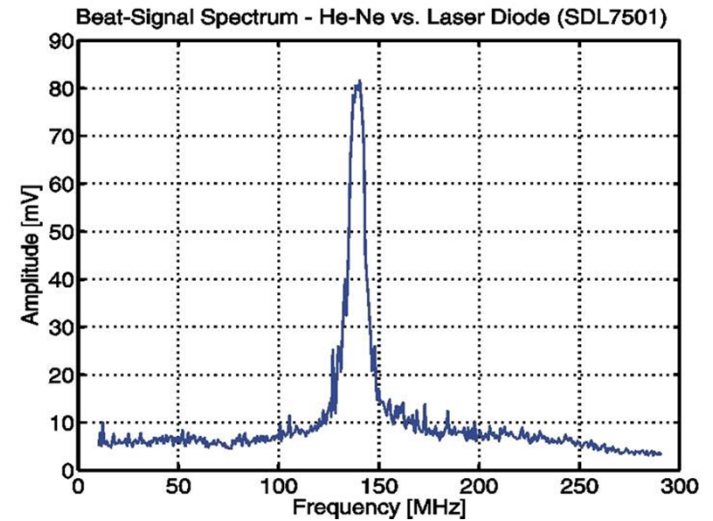
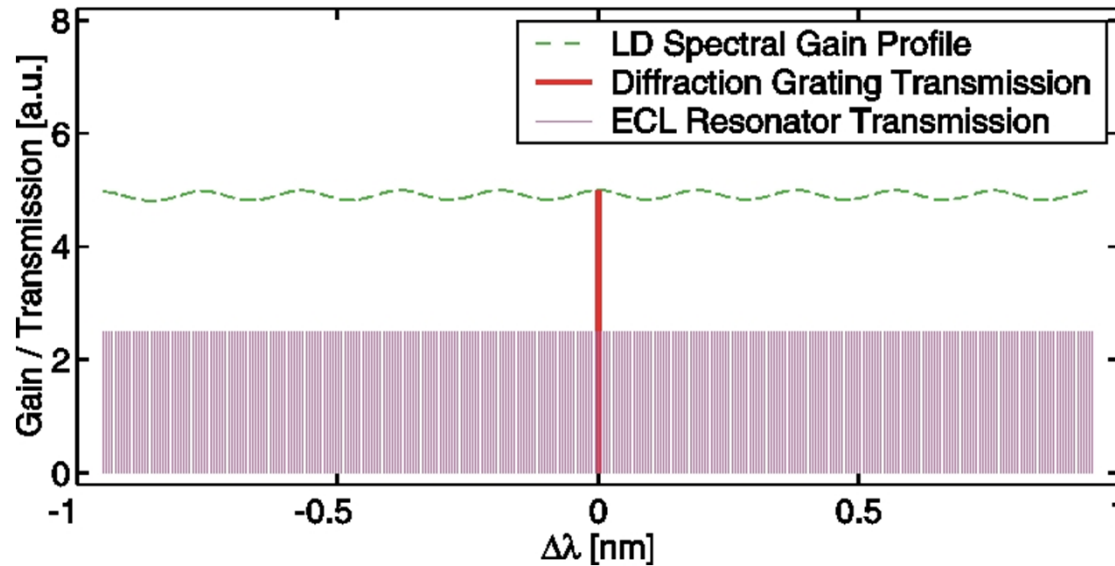


(b) Detailed View of Single-Mode Selection of ECL Laser

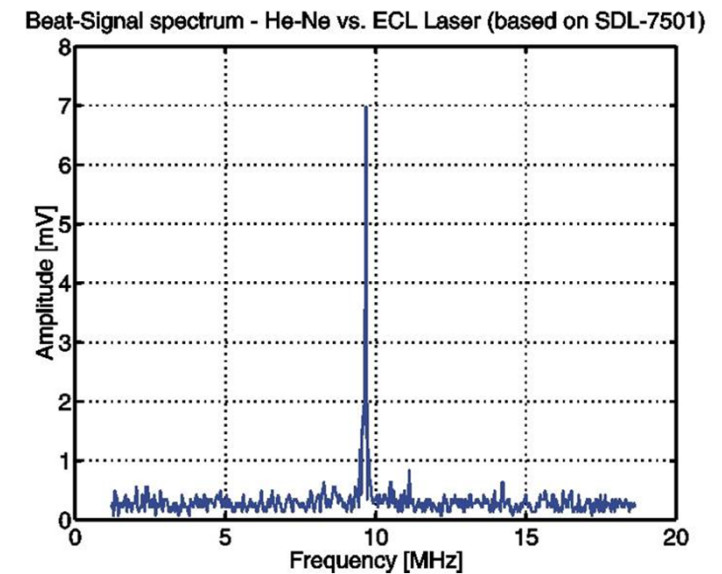
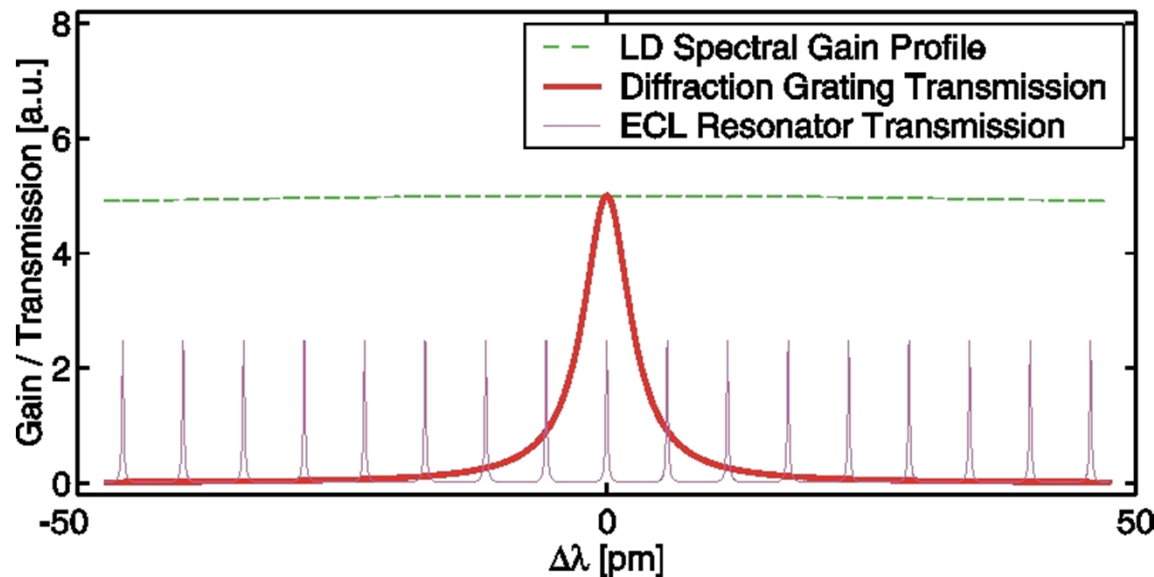


Extended Cavity Lasers – mode selection

(a) Principle of Single-Mode Selection of ECL Laser



(b) Detailed View of Single-Mode Selection of ECL Laser



Laserové diody se svislým rezonátorem (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) VCSEL

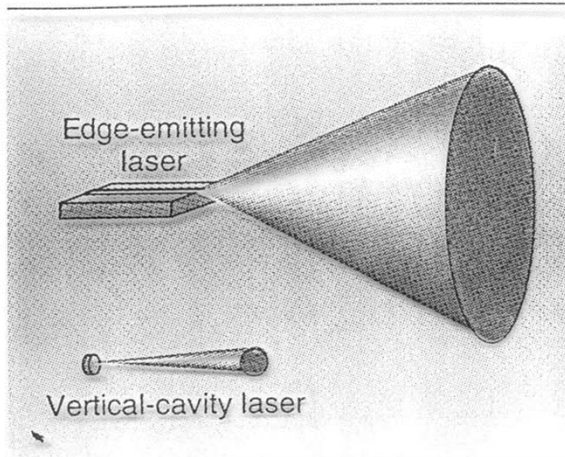
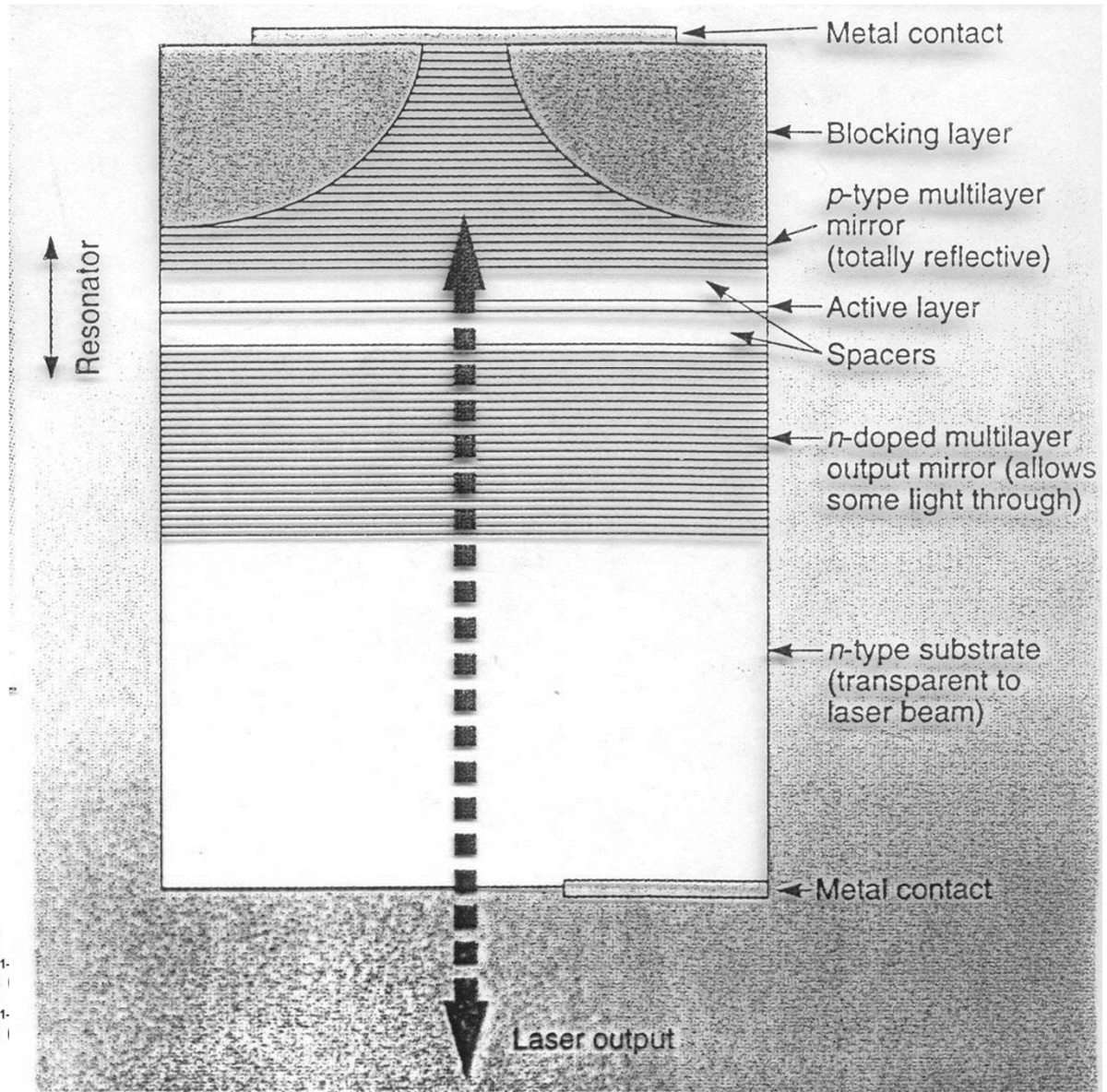
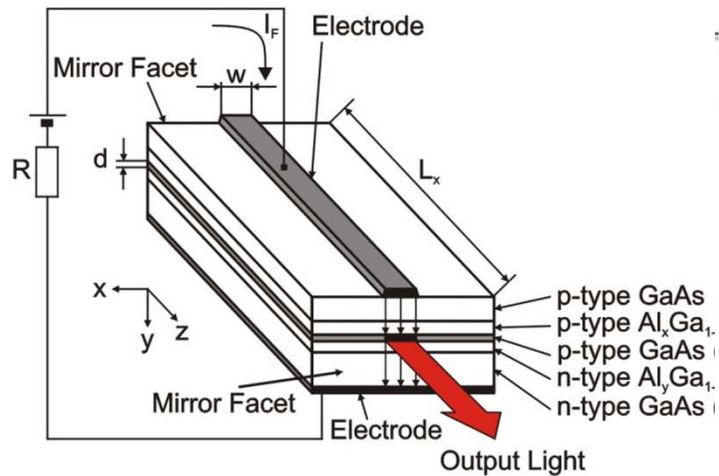


FIGURE 1. Output beam of an edge-emitting diode laser (top) diverges from its $1 \times 3 \mu\text{m}$ origin to a $60^\circ \times 19^\circ$ far-field pattern. The VCSEL (bottom) maintains circular symmetry from the $7.5\text{-}\mu\text{m}$ -diameter origin to a 7.6° far-field pattern.



Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)

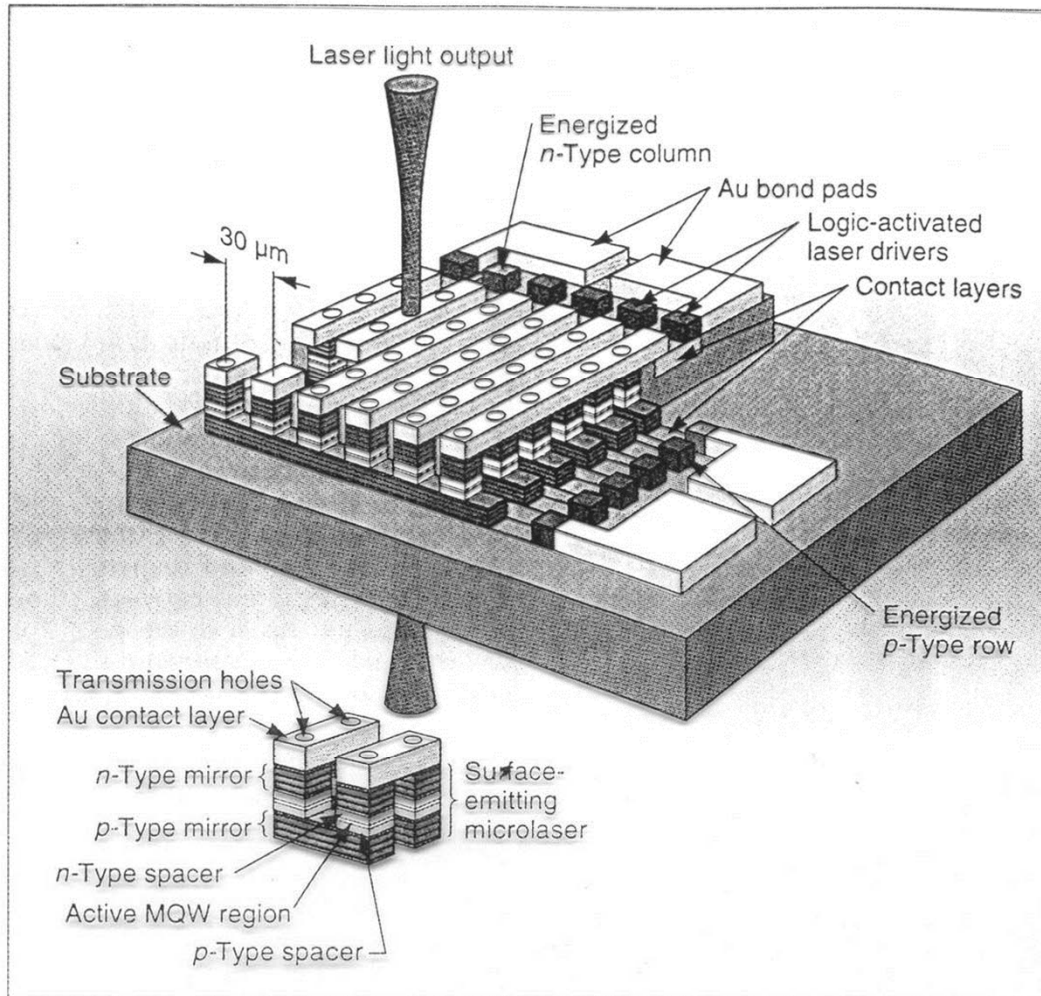


FIGURE 2. Two-dimensional VCSEL array integrates laser drivers and optoelectronic circuitry, which allows large numbers of independently controllable VCSELs with a small number of electrical contacts. (Courtesy, Sandia National Laboratories).

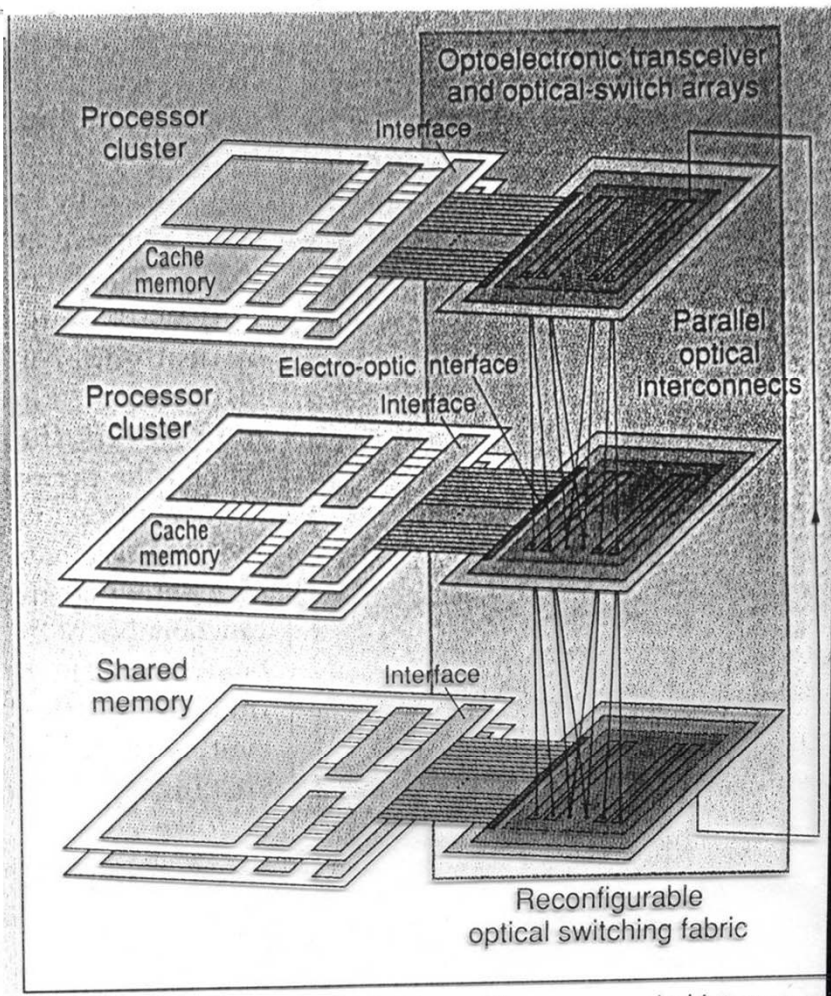


FIGURE 1. A parallel, reconfigurable multiprocessor optical-interconnected network permits data transfer between processors while allowing access to shared resources, such as memory.

Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)

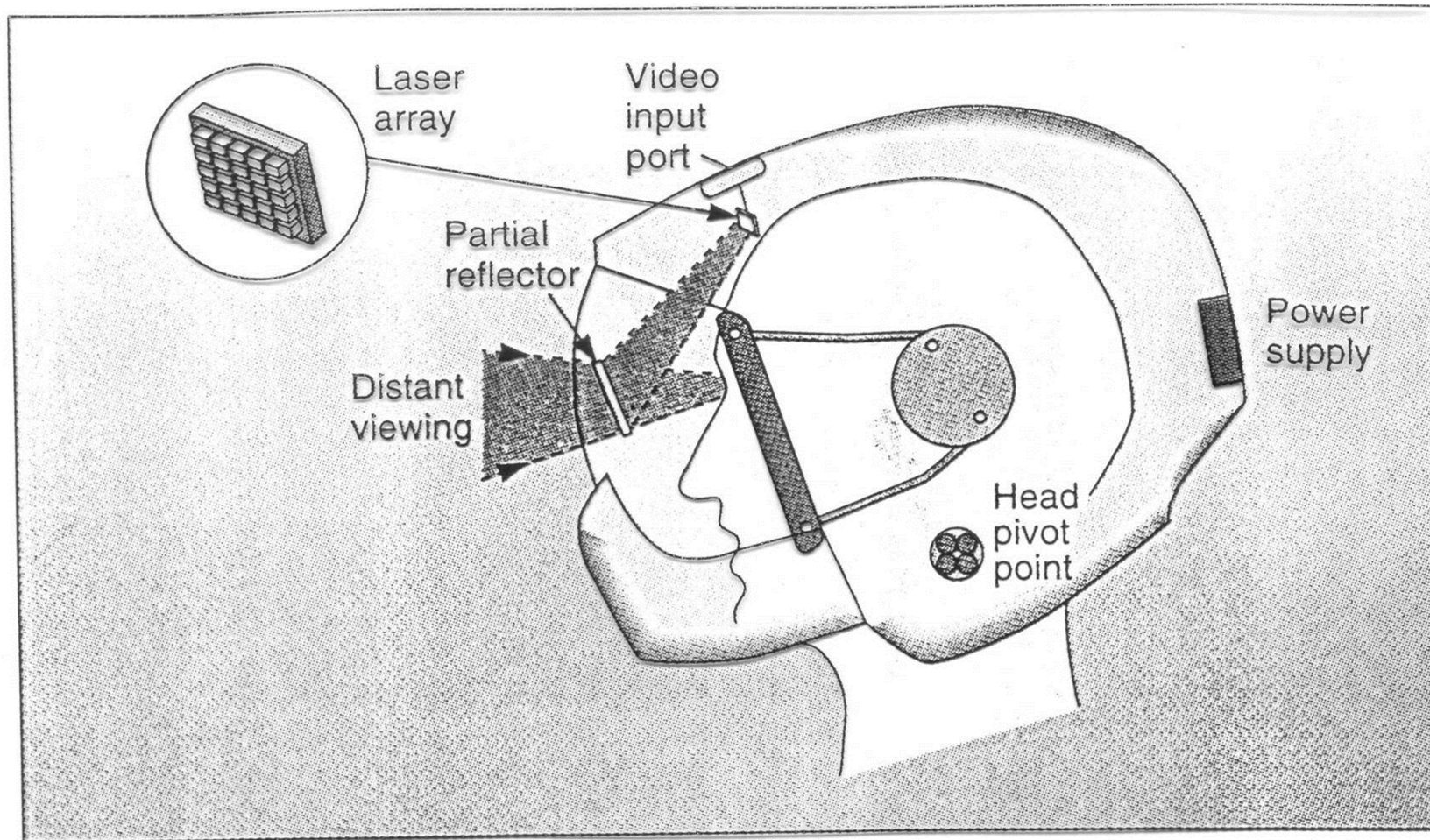


FIGURE 4. Ultralightweight, compact two-dimensional VCSEL array can be nonobtrusively mounted into a helmet for sophisticated identification, ranging, and tracking applications.

Data Storage based on technique of Compact Disc

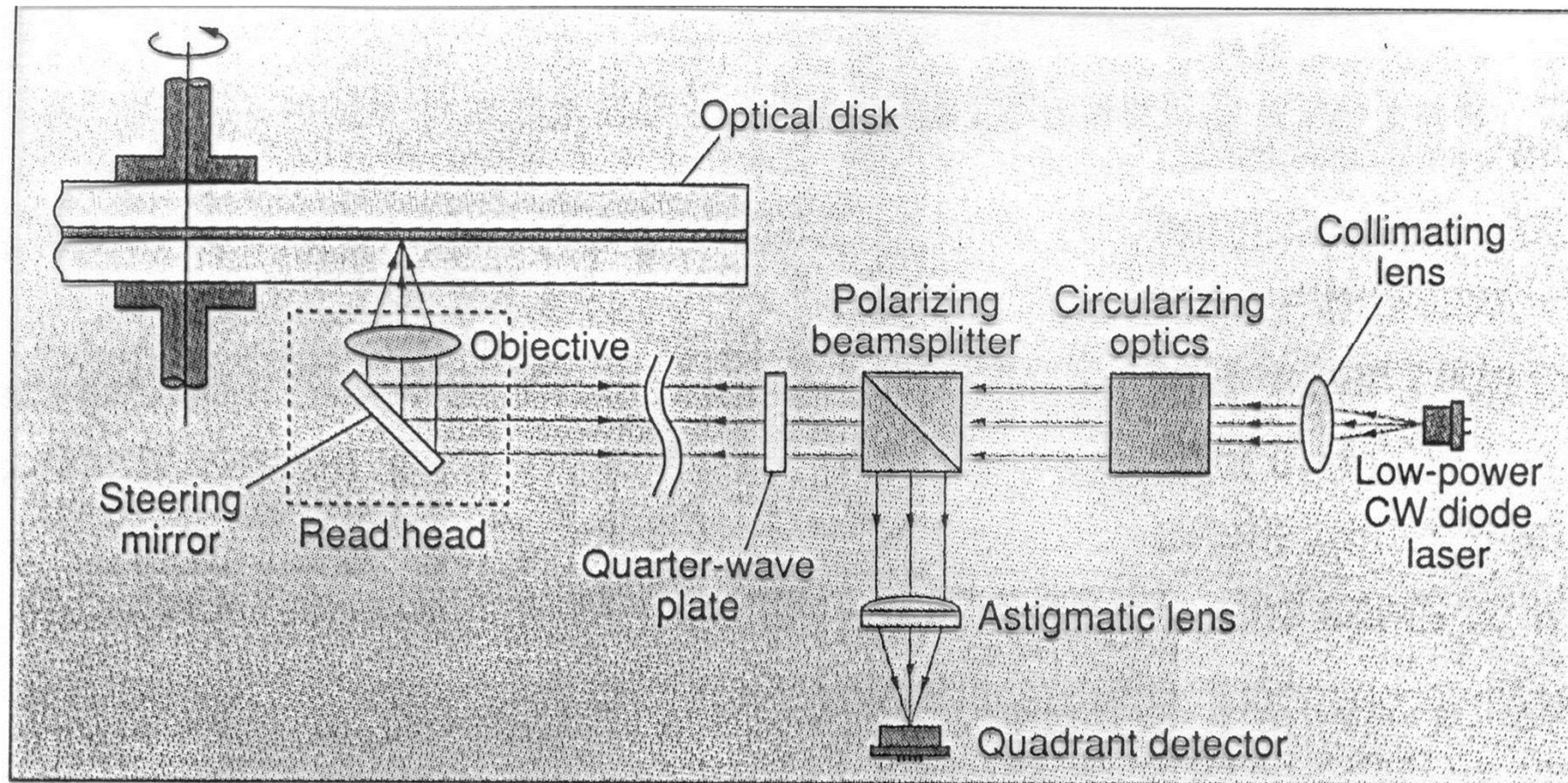


FIGURE 1. To read information stored on a CD optical disk, collimated light from a low-power CW diode laser is first focused on the spinning disk by an objective in the read head. Pits on the CD modulate the reflected light intensity, which is rerouted to the quadrant detector by a polarizing beamsplitter.

Data Storage based on technique of Compact Disc

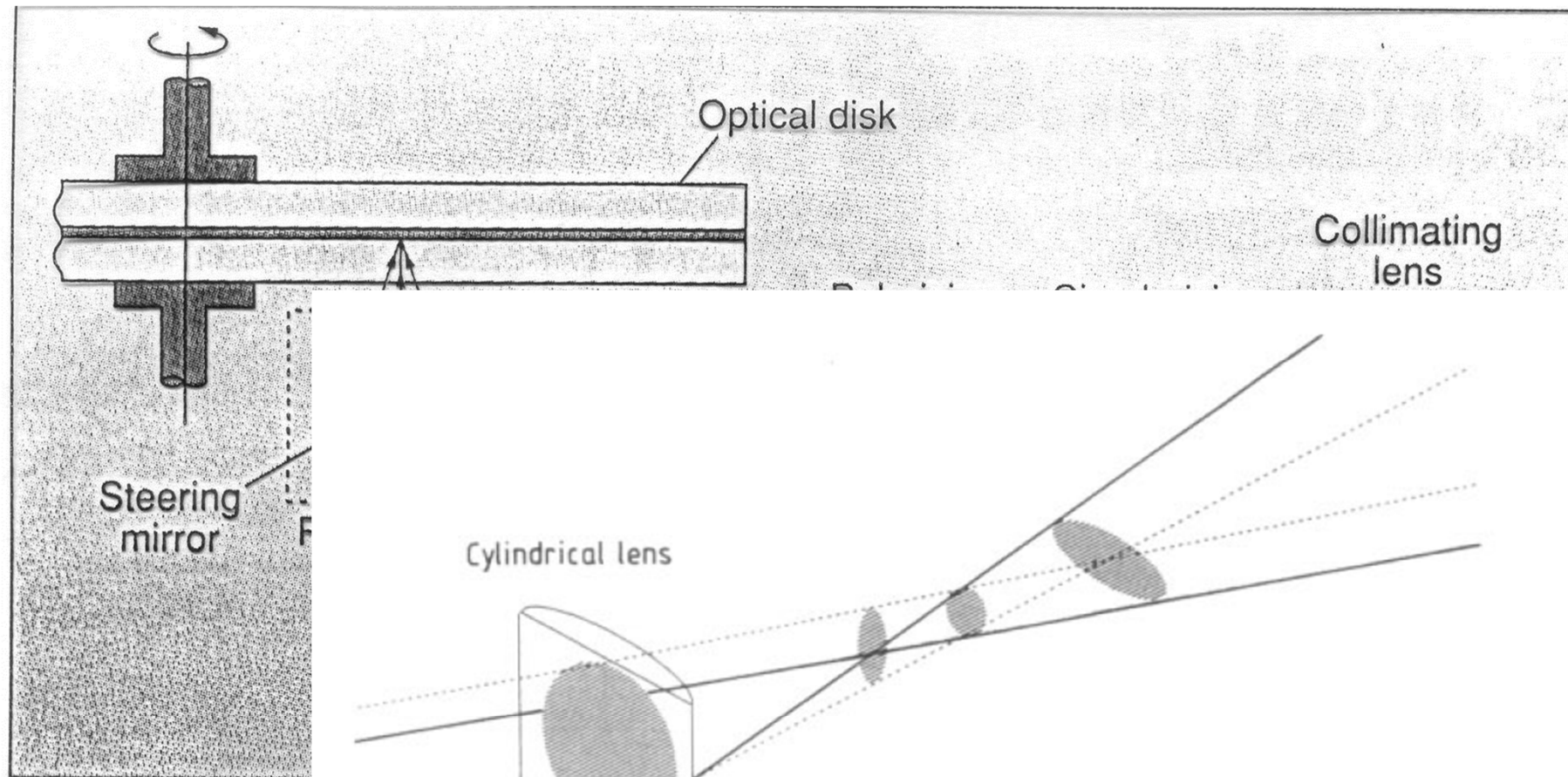
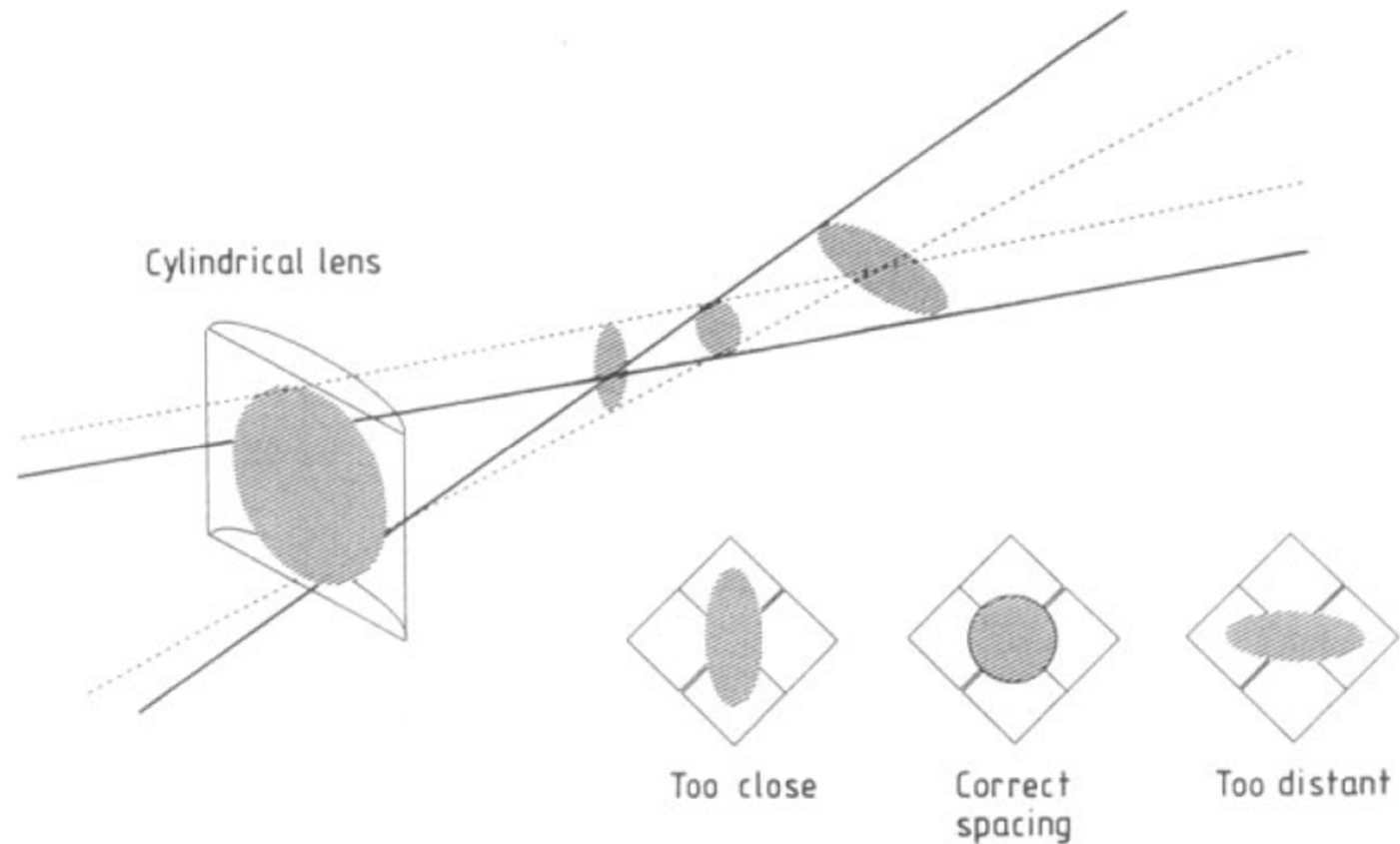


FIGURE 1. To read information from a compact disc, a diode laser is first focused by a lens to modulate the reflected beam by a beamsplitter.



Pevnolátkové lasery

Primární pevnolátkové lasery				Vibronické lasery	
Typ	Vlnová délka [nm]	Typ	Vlnová délka [nm]	Typ	Vlnová délka [nm]
Rubínový	694,3	Er:sklo	1 540	Ti:Safír	670-1070
Nd:YAG	1 064	Er:YLF	850	Alexandrit	700-830
Nd:sklo fosfátové	1 054		1 230	Li:CAF	720-840
Nd:sklo křemenné	1 061		1 730	Cr:emerald	729-842
Nd:YLF	1 047		2 800	Nd:GsGG	740-850
	1 053	Ho:YAG	2 127	Li:SAF	780-920
Nd:GSGG	1 061	Ho:YSGG	2 088	Cr:fosterite	1167-1345
Er:YAG	2 940	Ho:YALO	2 850	Co:MgF ₂	1750-2500
			2 920	Tm:YAG	1870-2160

Pevnolátkové lasery

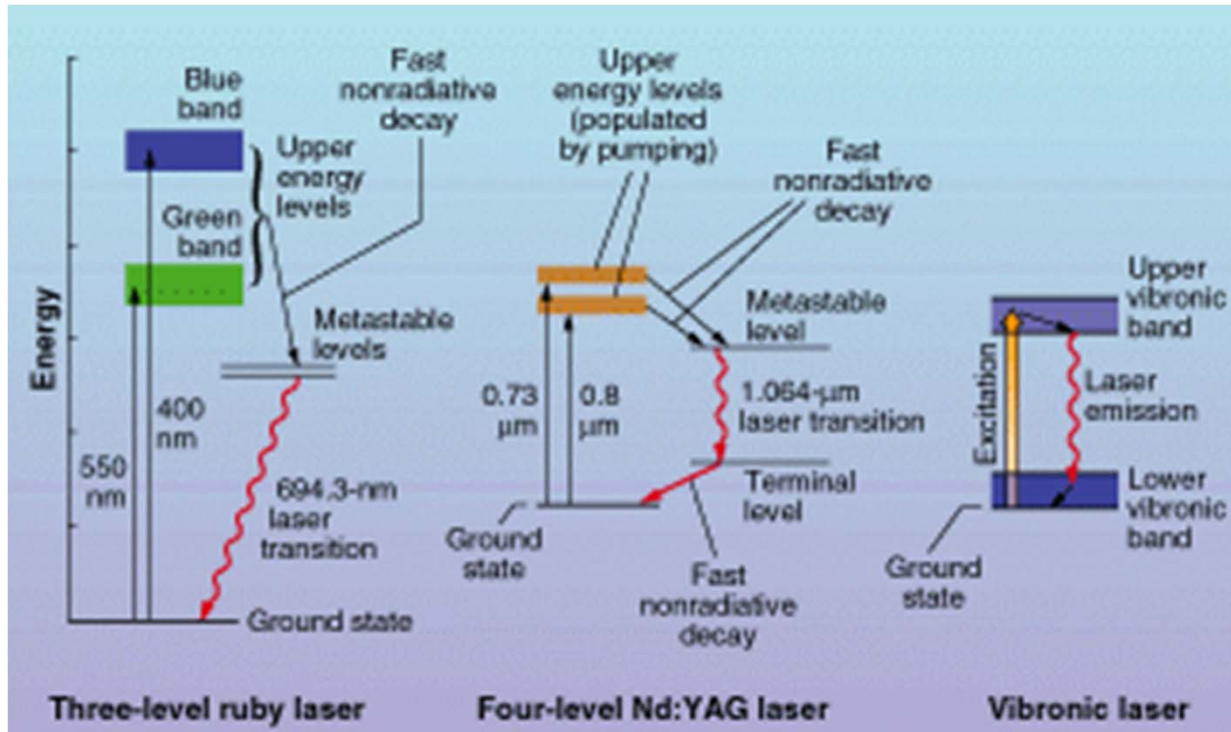


Table 1. Primary wavelengths of solid-state lasers

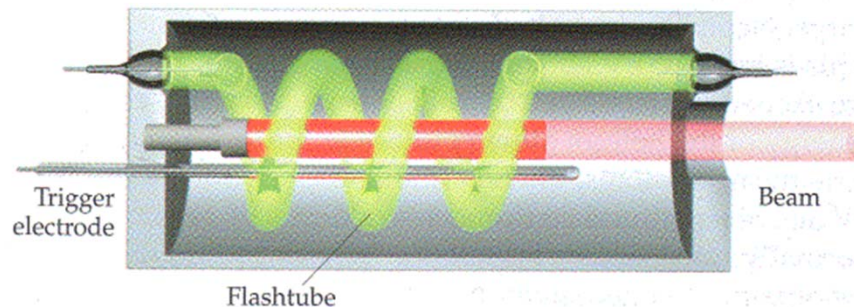
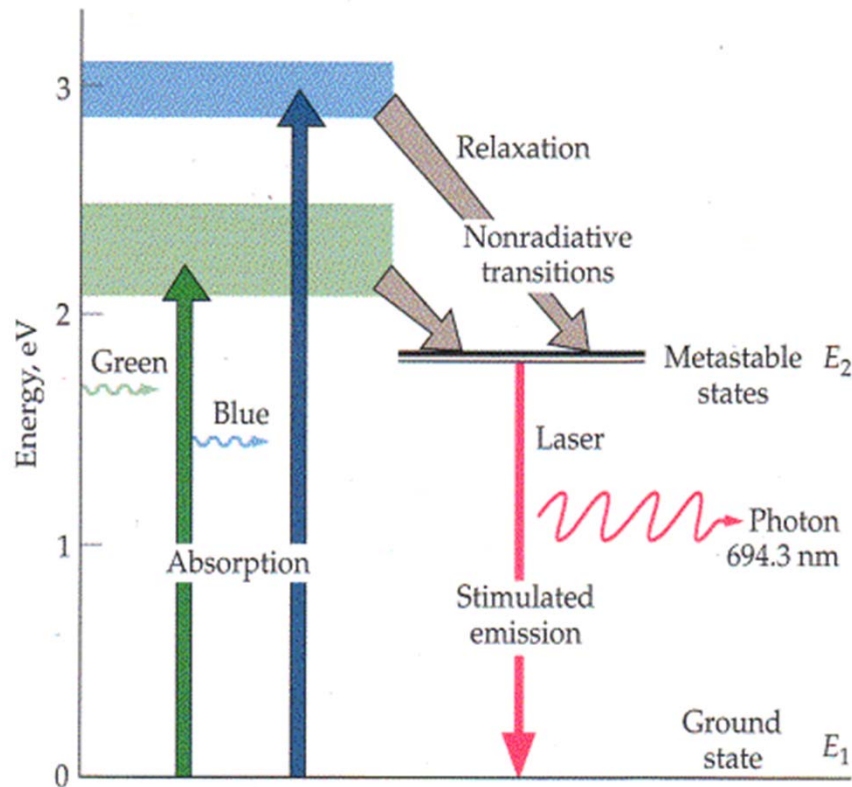
Type	Wavelength (nm)
Ruby	694.3
Nd:YAG	1064
Nd:glass	
Phosphate	1064
Silicate	1061
Nd:YLF	1047
	1053
Nd:GSGG	1061
Er:YAG	2940
Er:glass	1540
Er:YLF	880
	1230
	1730
	2800
Ho:YAG	2127
Ho:YSGG	2088
Ho:YALO	2850
	2920

Vibronic lasers

Type	Wavelength range (nm)
Ti:sapphire	670-1070
Alexandrite	700-830
Li:CAF	720-840
Cr: emerald	729-842
Nd:GSGG	740-850
Li:SAF	780-920
Cr:fosterite	1167-1345

- opticky čerpané lasery, aktivní prostředí je pevná látka za pokojové teploty
- atomy odpovědné za generaci laserového záření jsou vybuzeny absorpcí fotonu a pak relaxují na metastabilní hladinu, ze které seskakují stimulovanou emisí

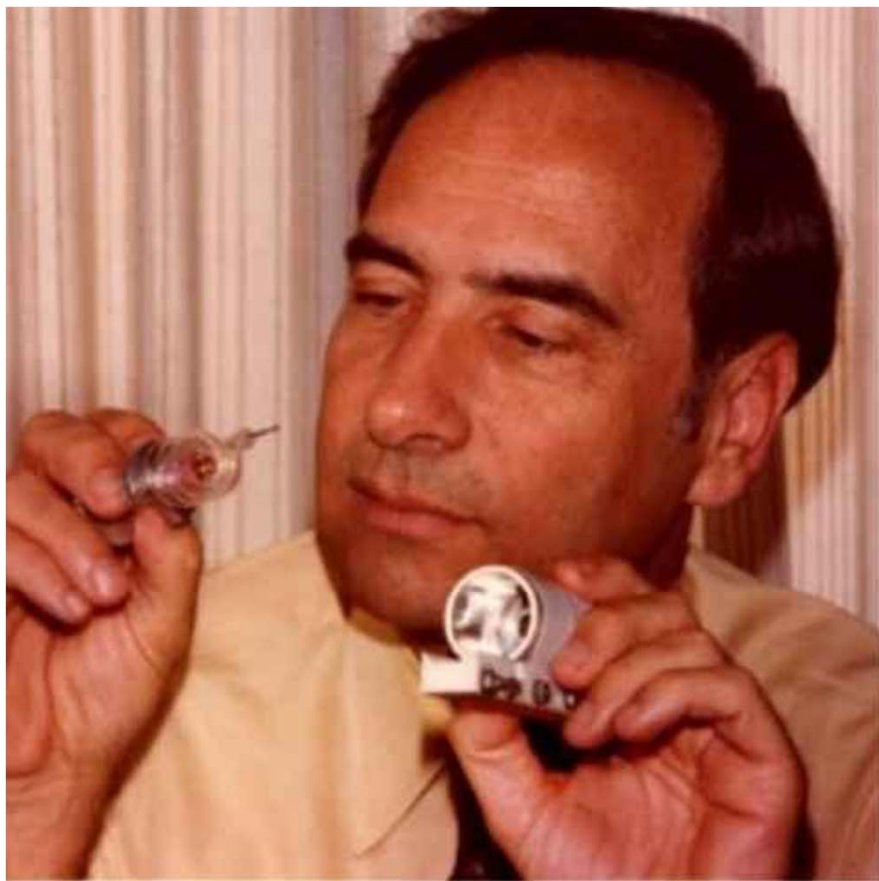
Rubínový laser



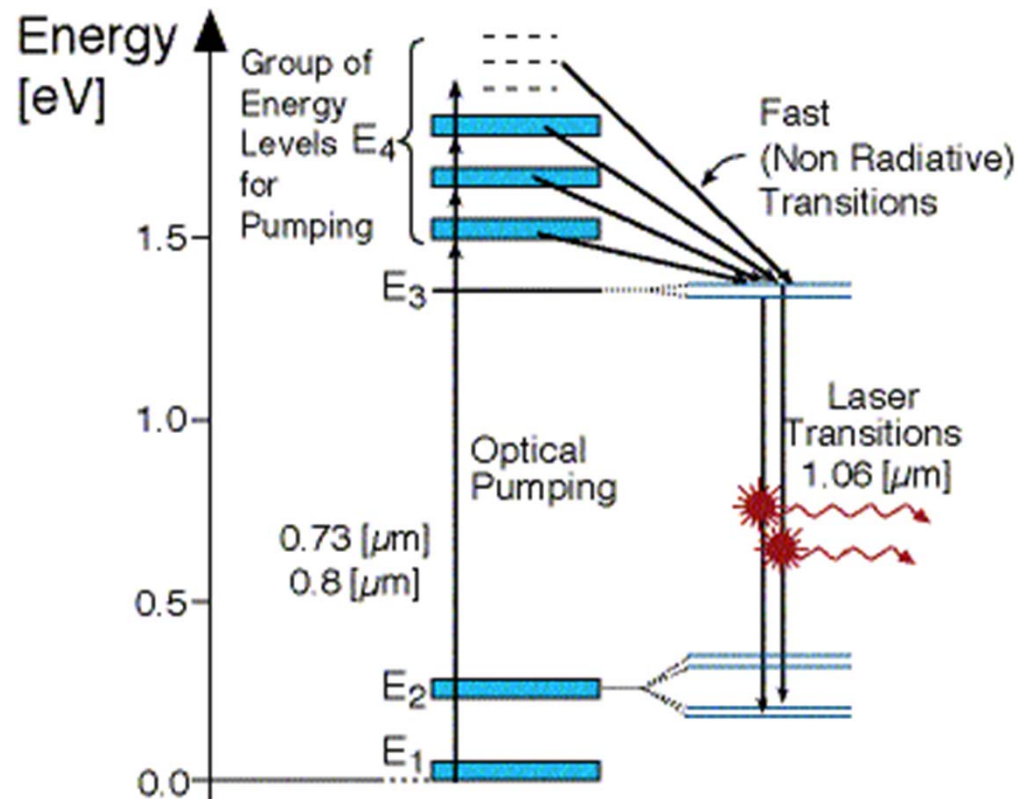
- Cr atomy absorbují modré nebo zelené světlo, proto je tento laser čerpán xenonovou výbojkou.
- vybuzené elektrony téměř ihned předávají část své energie okolní krystalové mříži a seskakují na metastabilní hladinu (105 krát déle než na předcházející). Odtud stimulovanou emisí seskakují na základní hladinu a září na 694,3 nm.
- tří hladinový systém - neefektivní, je potřeba víc jak polovinu aktivních atomů vypudit ze základní hladiny, aby se dosáhlo inverze. Zato rubínový krystal může skladovat ohromné množství energie, která za vhodných podmínek může být naráz uvolněna ve vysoce výkonném pulsu. CW (kontinuální) režim je velmi problematický, potřeba intenzivní čerpání.
- vrtání tvrdých materiálů, laserová lokace družic, lékařství,

Rubínový laser

První laser rozsvítil Theodore Maiman (1927-2007) v 1960!!



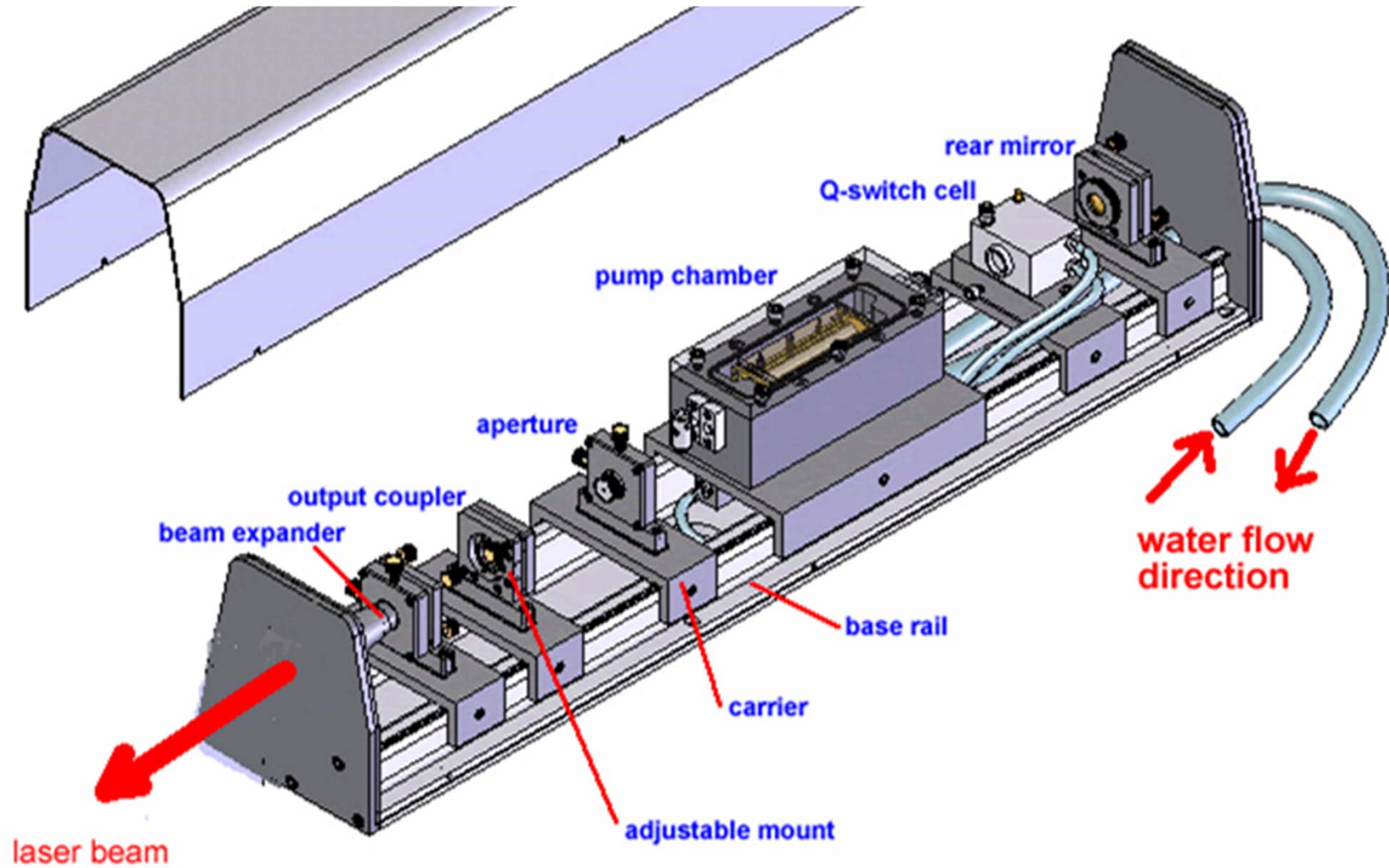
Nd:YAG laser



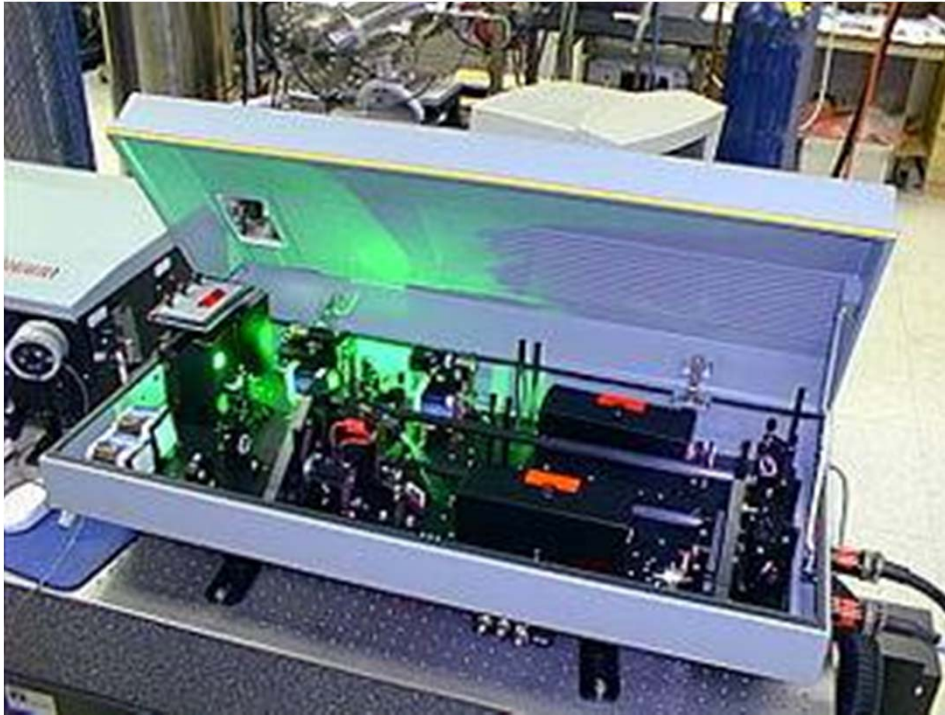
➤ Nd:Y₃Al₅O₁₂

- čtyř hladinový systém - efektivnější
- nejúspěšnější pevnolátkový materiál
- elektrony v Nd jsou buzeny IR fotony 730 - 800nm. Z horní hladiny rychle seskakují na metastabilní hladinu předávajíc část energie krystalové mříž. Zde setrvávají asi 250 mikrosekund a přeskakují do hladiny, odkud téměř ihned přechází na základní hladinu. Proto k dosažení inverze v obsazení hladin není nutné vybudit polovinu zúčastněných atomů. Elektrony zůstávají na metastabilní hladině dlouho a vytváří excitační reservoár (mnohem větší než u konkurujících barvivových) a není proto potřeba tak silných čerpacích zdrojů.
- CW (až 100 W) i pulsní (5ps až zlomky sekund)
- dříve čerpán kryptonovou výbojkou, nověji polem laserových diod (velmi kompaktní konstrukce), které umožňují velmi kompaktní konstrukci.

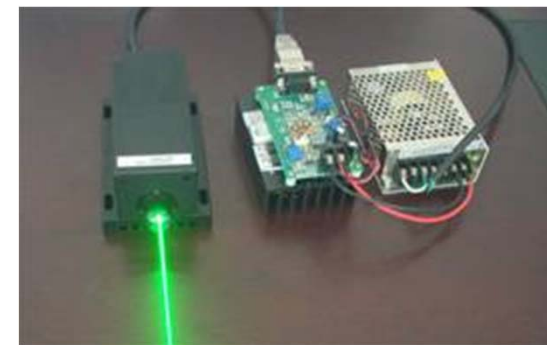
Nd:YAG laser



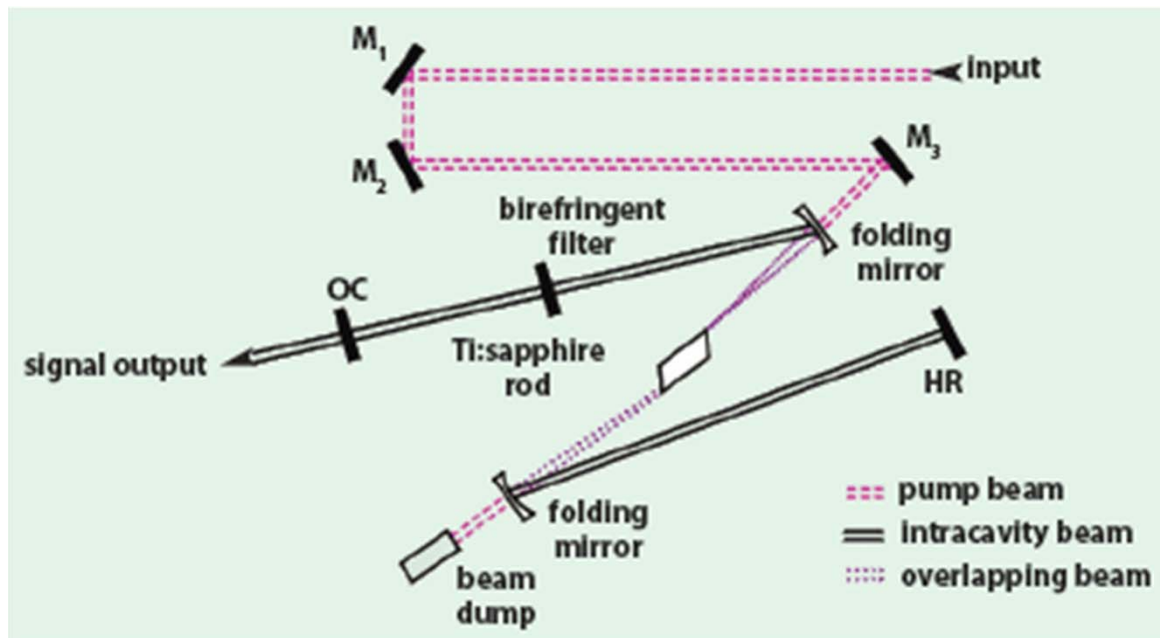
Nd:YAG laser



► 1064nm, násobením frekvence v nelineárním krystalu lze dostat i násobky základní frekvence (532 a 335 nm). Tyto lasery prodělávají prudký rozvoj a miniaturizaci, zejména proto, že nejsou k dispozici jiné kompaktní zdroje v zelené oblasti spektra, které by mohly být použity např. v barevných laserových tiskárnách nebo scannerech.



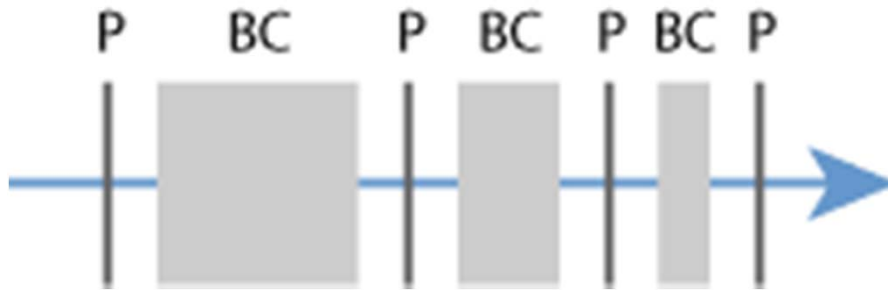
Titan Safírový laser



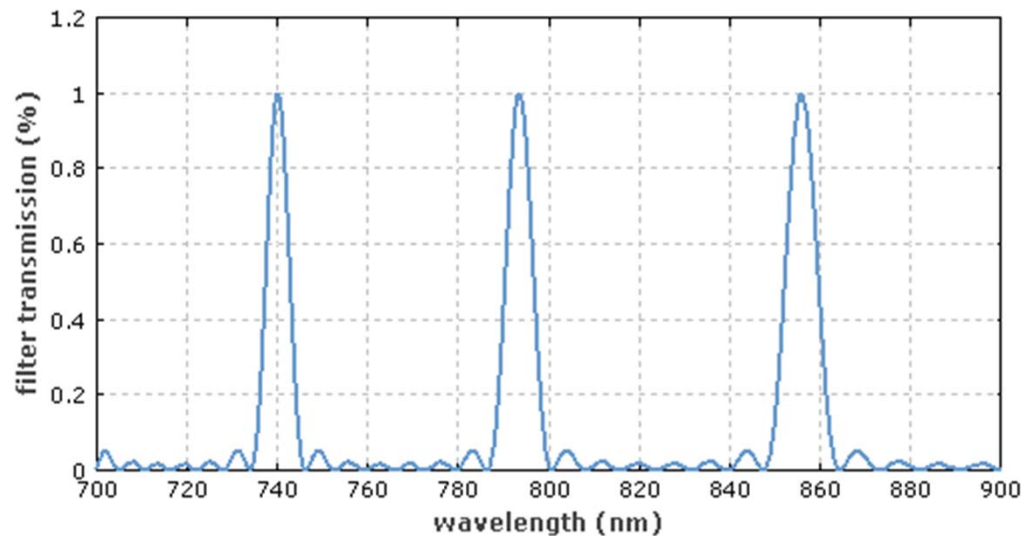
Rezonátor se stojatou vlnou
Standing-wave cavity (Spectra-Physics Model 3900S). This laser is a passively stabilized Ti:sapphire system that lases simultaneously on numerous longitudinal cavity modes. The titanium-doped sapphire crystal gain element, mounted in a water-cooled tower, provides laser gain in the wavelength range between 675 and 1130 nm when pumped with the green output beam of the DPSS Millennia.

Wavelength tuning by a multiplate birefringence or Lyot filter which is mounted within the cavity at Brewster's angle in order to minimize reflection losses. This device modulates the spectral gain of the laser cavity by providing high transmission at a specific wavelength range within the spectral gain curve. The laser is forced to operate at that specific wavelength, which can be varied by rotating the birefringence filter (also referred to as the BiFi). The output of this type of laser has a linewidth of less than 40 GHz FWHM ($< 1.5 \text{ cm}^{-1}$). By adding intracavity etalons, this linewidth can be narrowed further to less than 1 GHz.

Birefringent (Lyot) filter

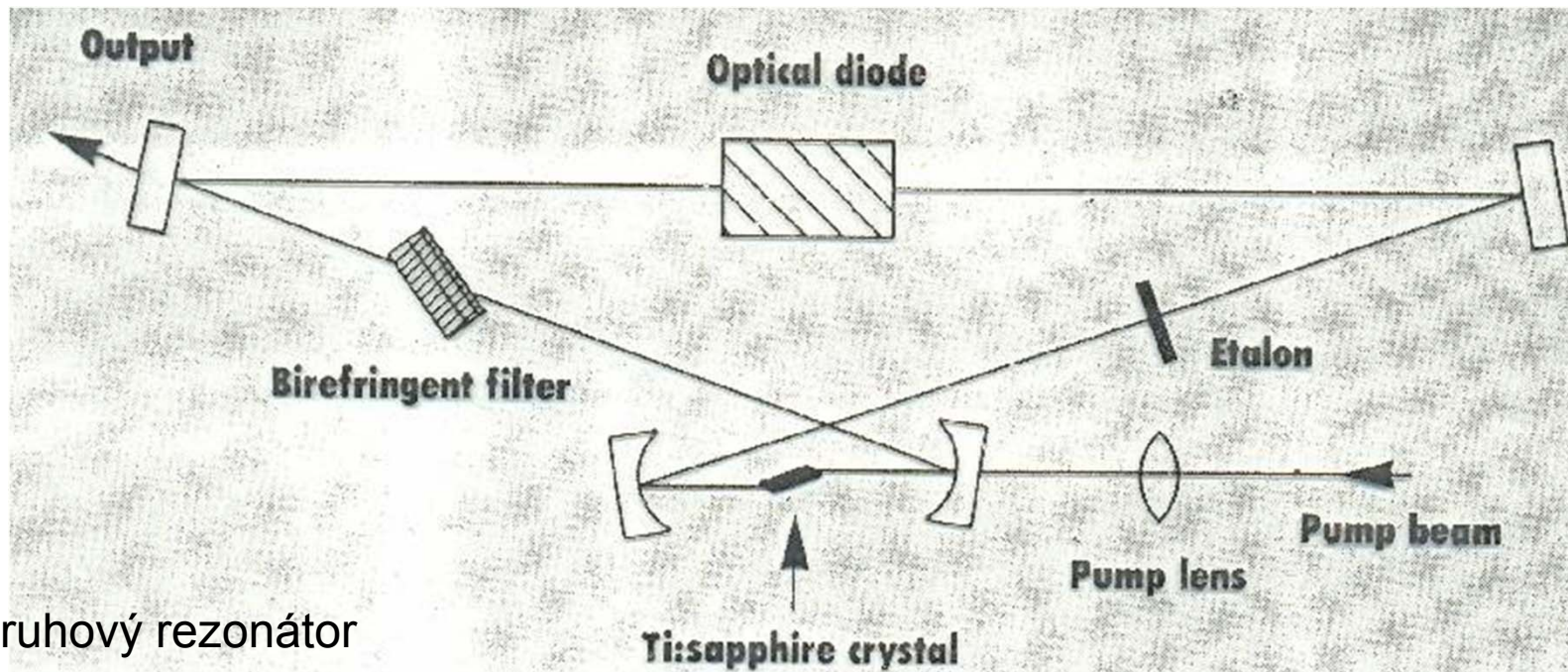


It consists of a sequence of birefringent crystalline plates (e.g. of quartz) and polarizers. The birefringent axis of each crystal is oriented at 45° to the axis direction of the polarizers. The light propagating in a crystal can be considered as containing two different linear polarization components, which experience a different phase delay. The relative phase delay for the two polarization components depends on the wavelength. Therefore, the loss of optical power at the subsequent polarizer is wavelength-dependent.



Transmission function of a Lyot filter containing three quartz plates, with thickness values of 5, 2.5, and 1.25 mm.

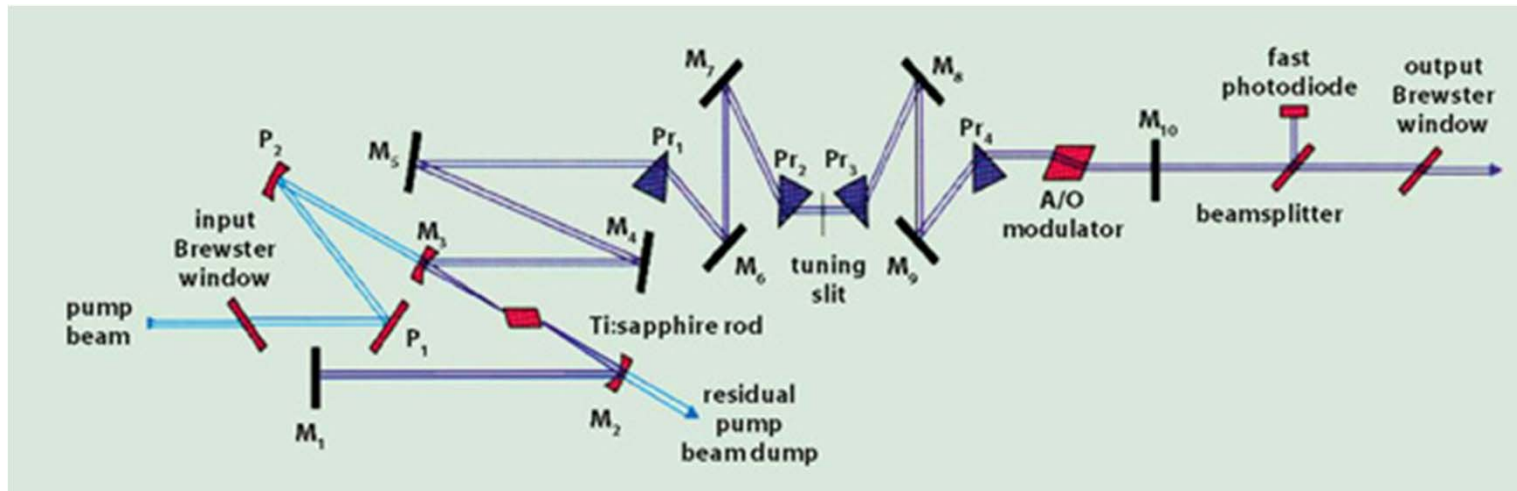
Titan Safírový laser



Kruhový rezonátor

Ring lasers have been used since the early 1980s to achieve tunable CW radiation from a single longitudinal cavity mode, so-called single-frequency radiation, with spectral bandwidths possible in the submegahertz region. Initially using a dye solution as the active medium, ring lasers are available today utilizing either dye or Ti:sapphire lasing media. The main difference between a ring laser and a standing-wave laser is the fact that, in the ring laser, the ring structure allows us to cause the radiation circulating in the cavity to form a unidirectional traveling wave. One out of many longitudinal modes is selected by passive wavelength-selective elements (birefringent filter and etalons).

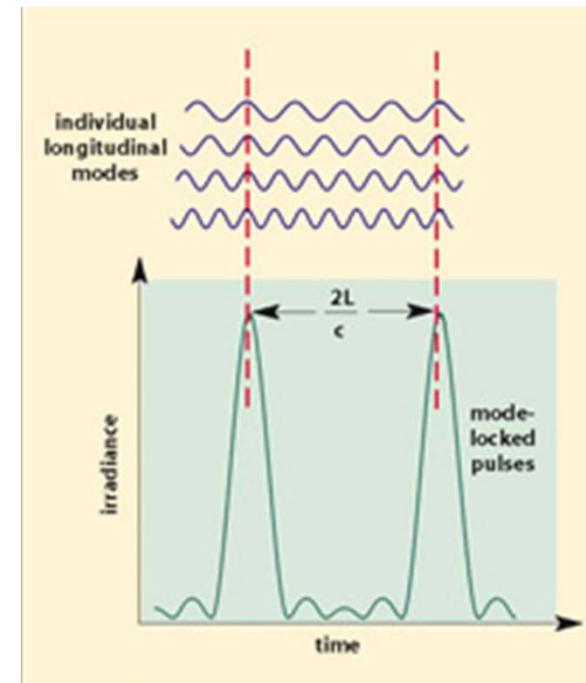
Titan Safírový laser – fs režim



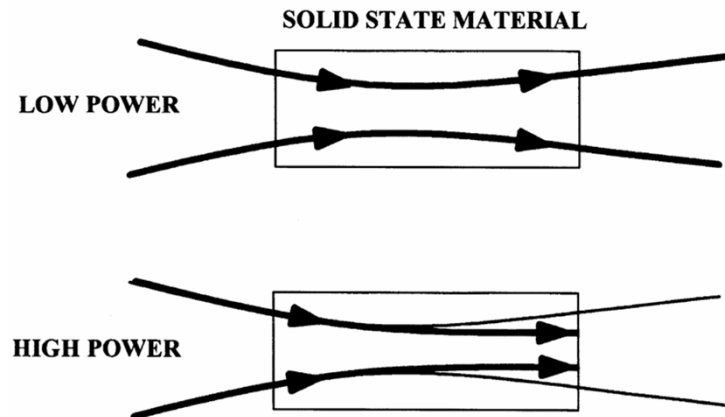
Acousto-optical modulator serves as a high-speed Q-switch. The pulse repetition rate of a mode-locked laser depends on the cavity length, with typical commercial lasers operating at around 80 MHz. Pulse duration is inversely proportional to bandwidth, so ultrafast lasers are inherently broadband; for example, a laser with a pulse width of 50 fs at 800 nm has a spectral linewidth of more than 15 nm. Some ultrafast lasers provide the option of modifying the cavity in order to narrow output linewidth at the expense of longer pulse duration.

Kerr lens effect can be used in fs pulse generation by passive mode-locking. With increasing pulse energy the Kerr lens focuses the light into the aperture and the losses decrease.

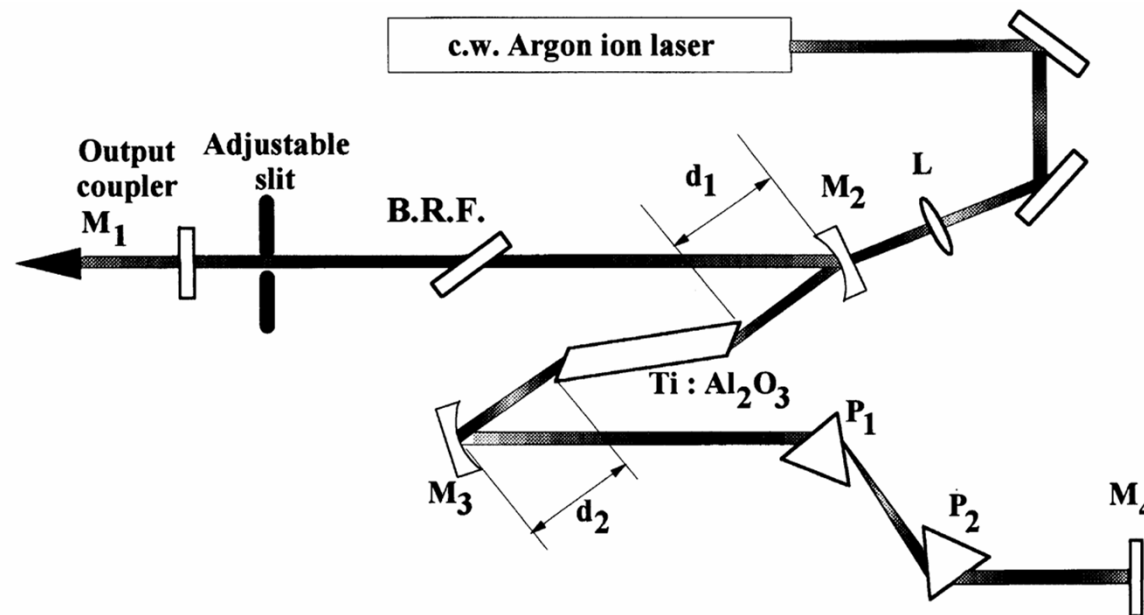
Vzpomínáte na ovčí laser?



Titan Safírový laser – fs režim

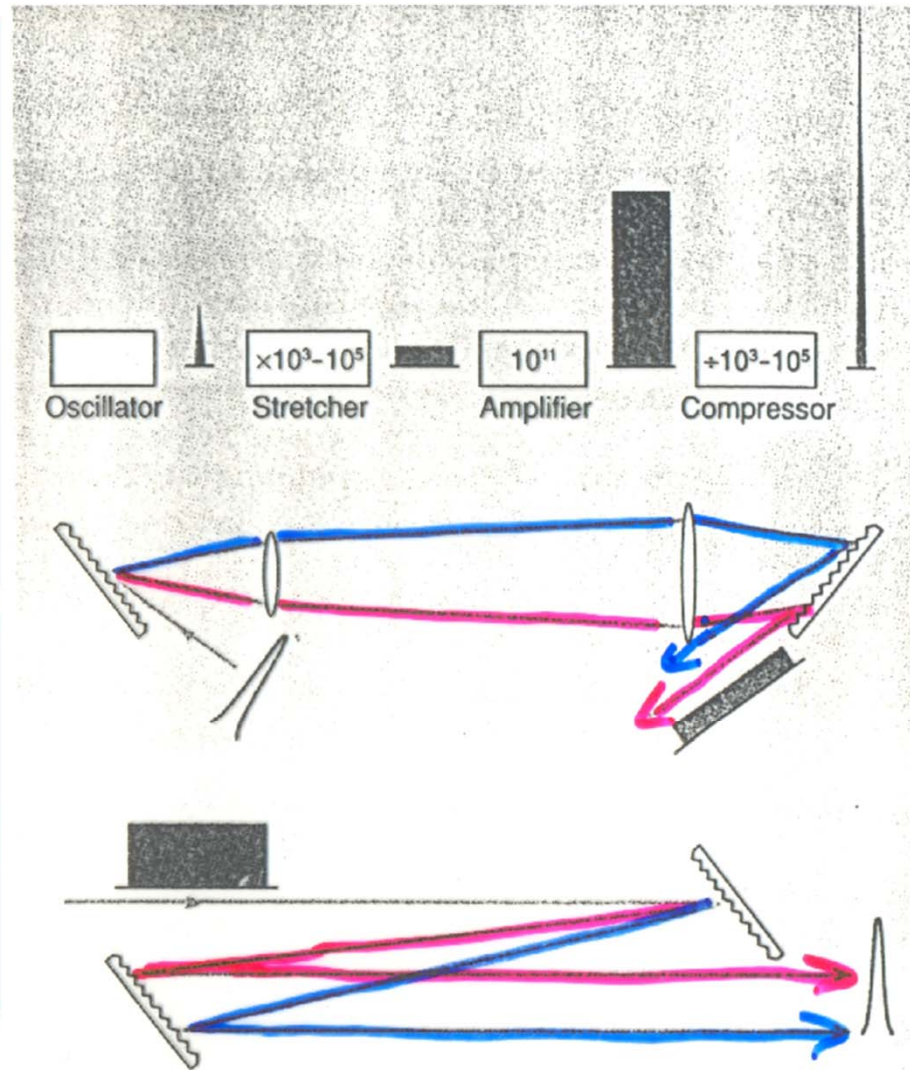
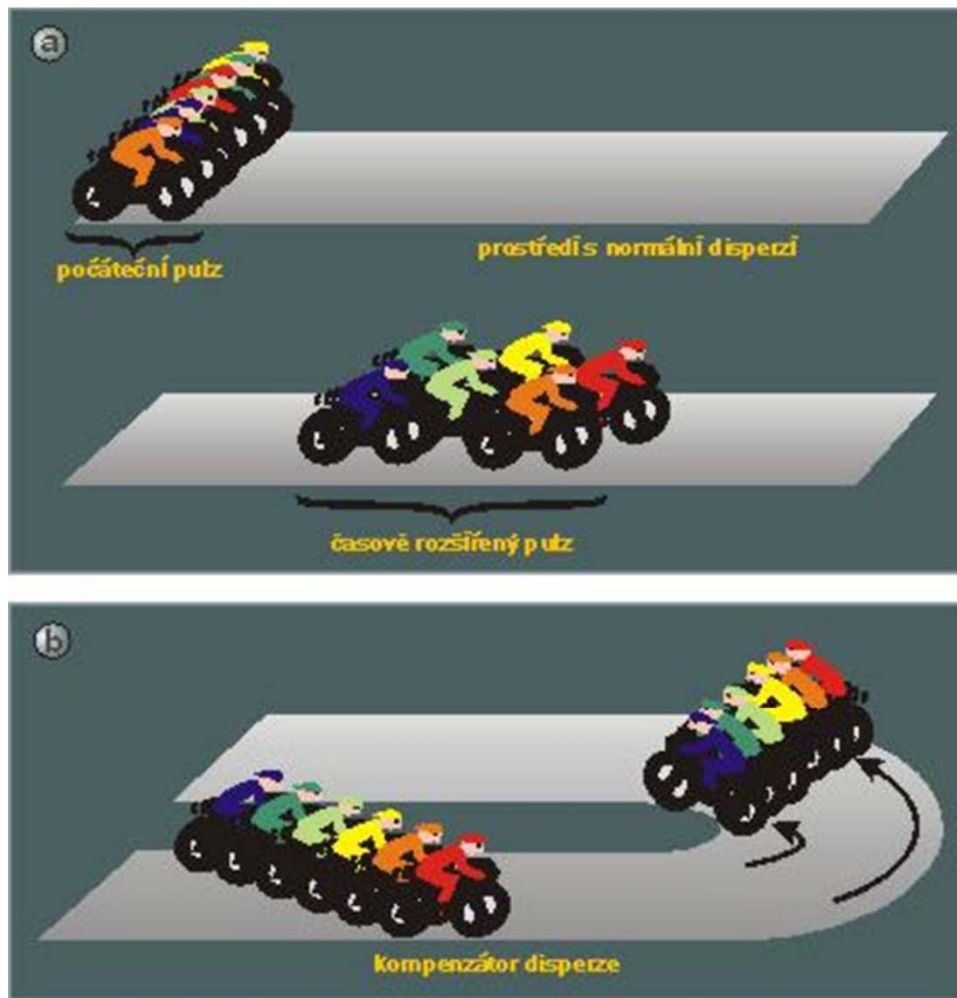


Kerr-lens modelocking vzniká nelineárním Kerrovým jevem, kdy se nelin. krystal chová při vysoké intenzitě jako čočka. Přidáním clony se sníží ztráty pro silné pulzy.



Čerpání Ti:Sa krystalu je optické, kontinuálním argonovým, nebo Nd:YAG laserem, zrcadla M_2 a M_3 jsou propustná pro vlnovou délku čerpacího laseru, hranoly P_1 a P_2 kompenzují disperzi v rezonátoru, dvojlomný filtr (B.R.F.) určuje střední frekvenci spektra podélných módů. Kerr-lens mode-locking je určován nastavitelnou štěrbinou.

Ultrakrátké pulsy



Kompenzace disperse

Ultrakrátké pulsy

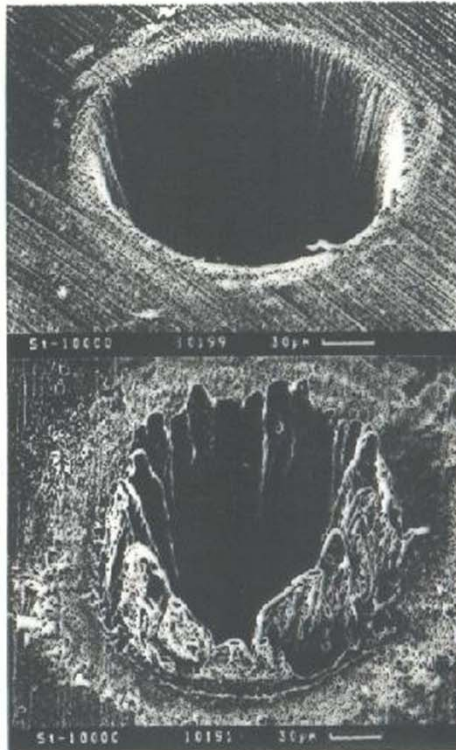


FIGURE 1. Hole drilled with ultrafast pulses (pulse duration of 200 fs, at 120 μJ , delivered 0.5 J/cm^2) in 100- μm -thick steel foil (top) is superior to hole processed with nanosecond pulses (pulse duration of 3.3 ns, at 1 mJ, delivered 4.2 J/cm^2) (bottom). In each case, the minimum laser fluence was used.

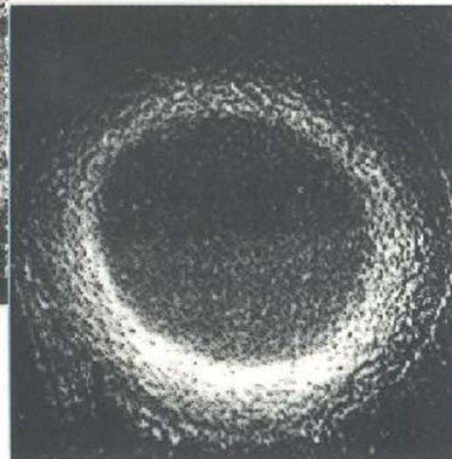
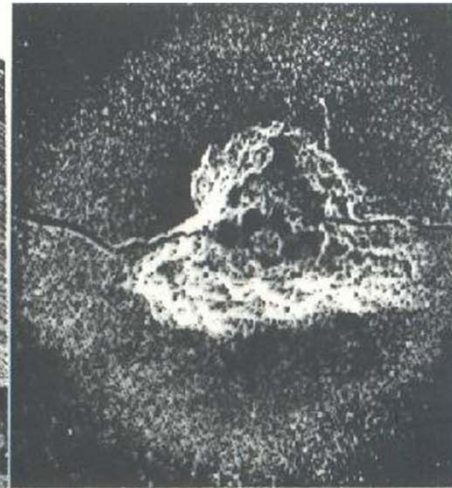


FIGURE 3. Teeth drilled with nanosecond pulses exhibit local heating and cracking from the large thermal stresses (top); femtosecond pulses produce a clean hole with no collateral damage (bottom).

Erbiem dopovaná vlákna

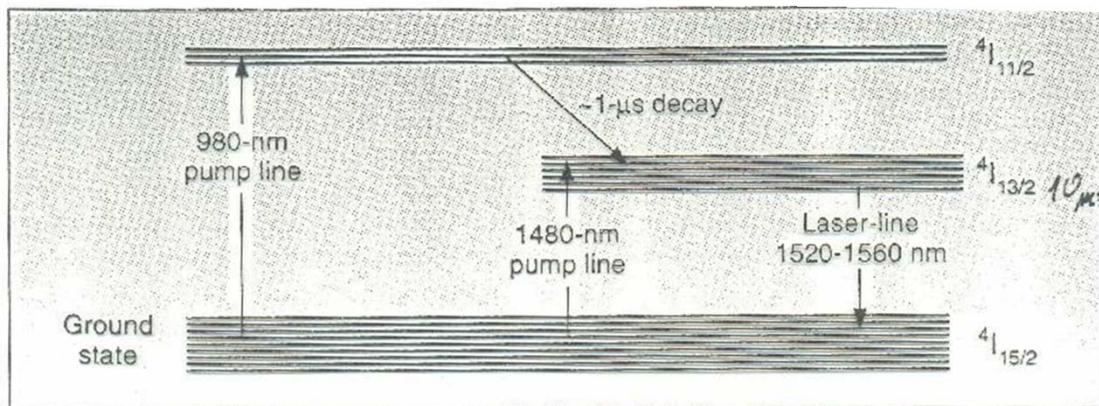
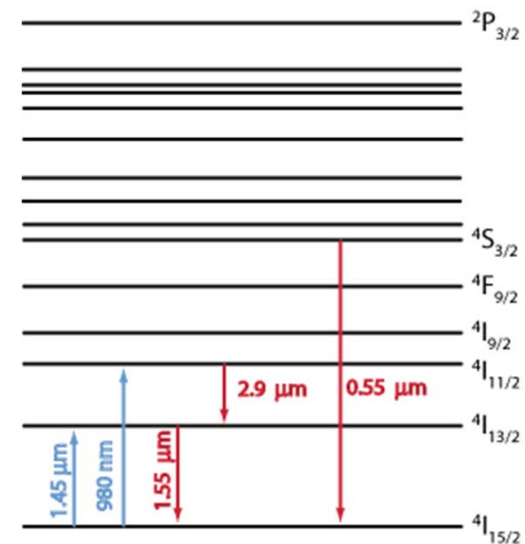
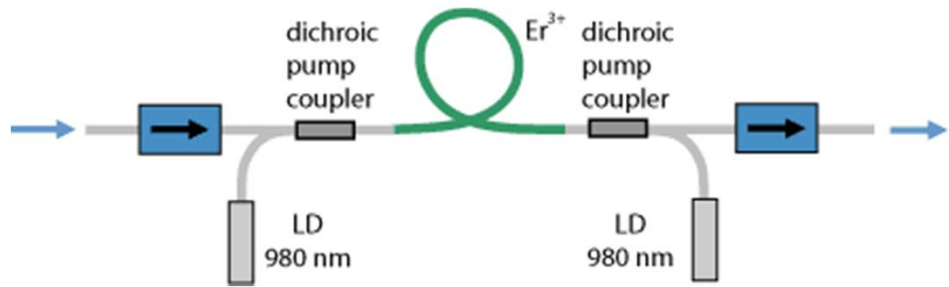


FIGURE 3. Energy-level diagram of erbium-doped silica shows excitation is to the higher $4I_{11/2}$ state with 980-nm light or to slightly higher sublevels of the $4I_{13/2}$ state with 1480-nm light.



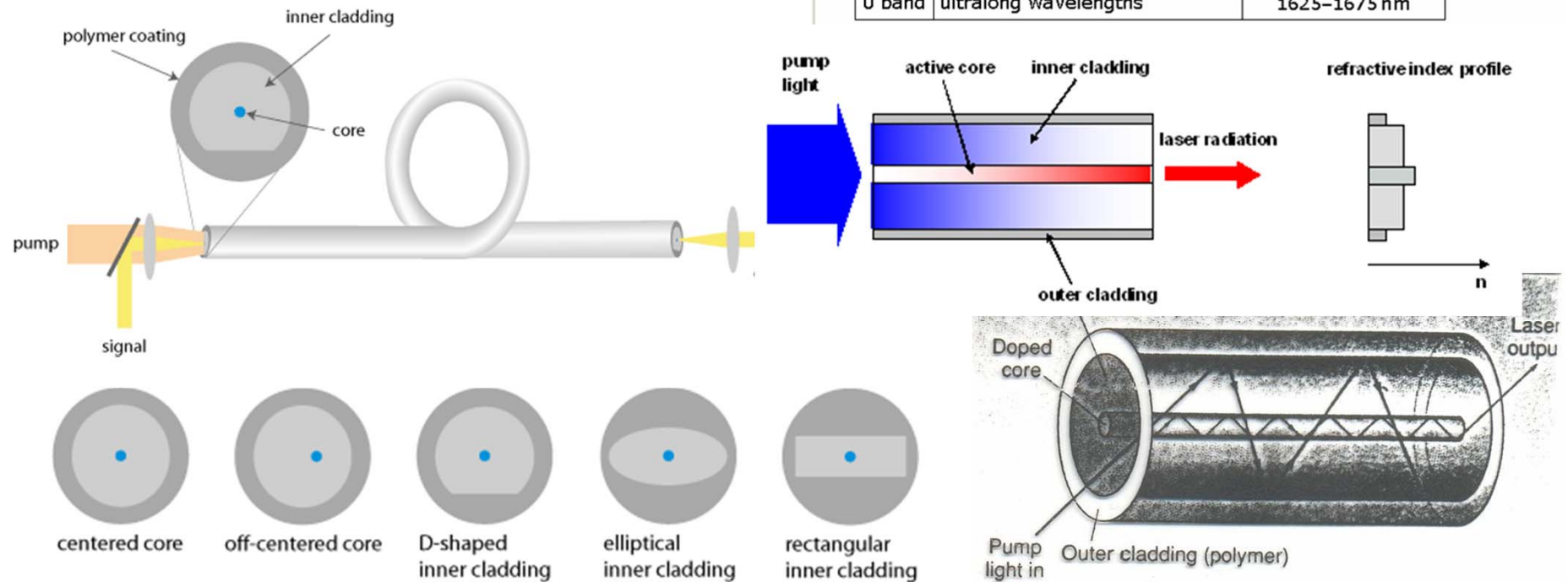
- koncentrace Er mohou být od 0,001 (několik metrů až stovek metrů vlákna stačí na zisky až desítky dB; 20-40dB); nebo mnohem nižší 0,000001 rozprostřené po celé přenosové délce vlákna.
- Výhody EDFA : stačí čerpací výkon několik mW, aby se dosáhlo optického zisku řádu tisíců. Zisk v EDFA nezávisí na polarizaci světla (aktivní dipóly v matici skla náhodně orientované a optická vlákna nezachovávají polarizaci), je stálý v teplotním rozsahu 100°C a je imunní vůči přeslechům, neboť není schopen stíhat tak rychlé děje (doba života elektronů na horní hladině Er je 10ms. Navíc EDFA lze připojovat ke klasickým vláknům s minimálními vazebnými ztrátami a bez odrazů na koncích vláken. Nevýhodou je pevná vlnová délka kolem 1500 nm.
- pro nejrozšířenější optické vlnovody (1300nm) se používá preseodymium (čerpané na 1017nm) jako ekvivalent Er. Je zde jen 10% účinnost v porovnání s Er a proto je třeba čerpacích výkonů kolem 300 mW. Tato vlnová délka není pokrytá žádnou LD a ani pevnolátkovým laserem (Nd:YLF pracuje na 1047, a proto by bylo potřeba výkonu kolem 700 - 800 mW).
- lasery na bázi EDFA využívají velkého zisku Er, jako koncová zrcadla stačí dobře seříznuté vlákno s odrazností 4%!! nebo se využívá kruhového rezonátoru (z vlákna) ze kterého se záření odvádí vláknovým směšovačem (a naopak čerpací svazek přivádí jiným)

Vláknové zesilovače



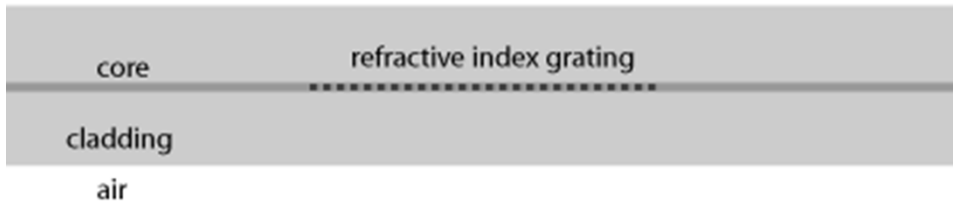
The second and third telecom windows are further subdivided into the following wavelength bands:

Band	Description	Wavelength range
O band	original	1260–1360 nm
E band	extended	1360–1460 nm
S band	short wavelengths	1460–1530 nm
C band	conventional ("erbium window")	1530–1565 nm
L band	long wavelengths	1565–1625 nm
U band	ultralong wavelengths	1625–1675 nm

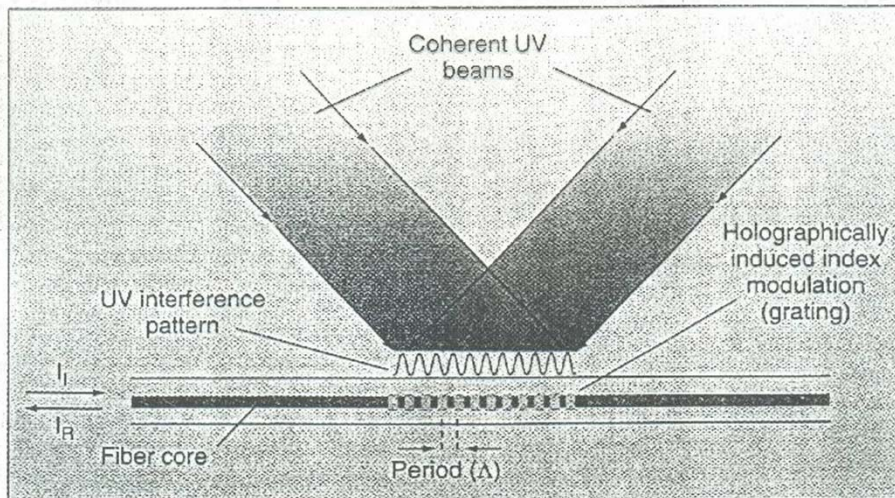


Cladding-pumped fiber amplifier based on a double-clad fiber. The signal light is launched into the doped core, while the pump light is launched into the inner cladding. The core is D-shaped for more efficient [pump absorption](#).

Vláknové mřížky



Zhotovení



Ultraviolet interference pattern from stable laser beams creates the period of a holographically written fiber grating.

Měření změn délky

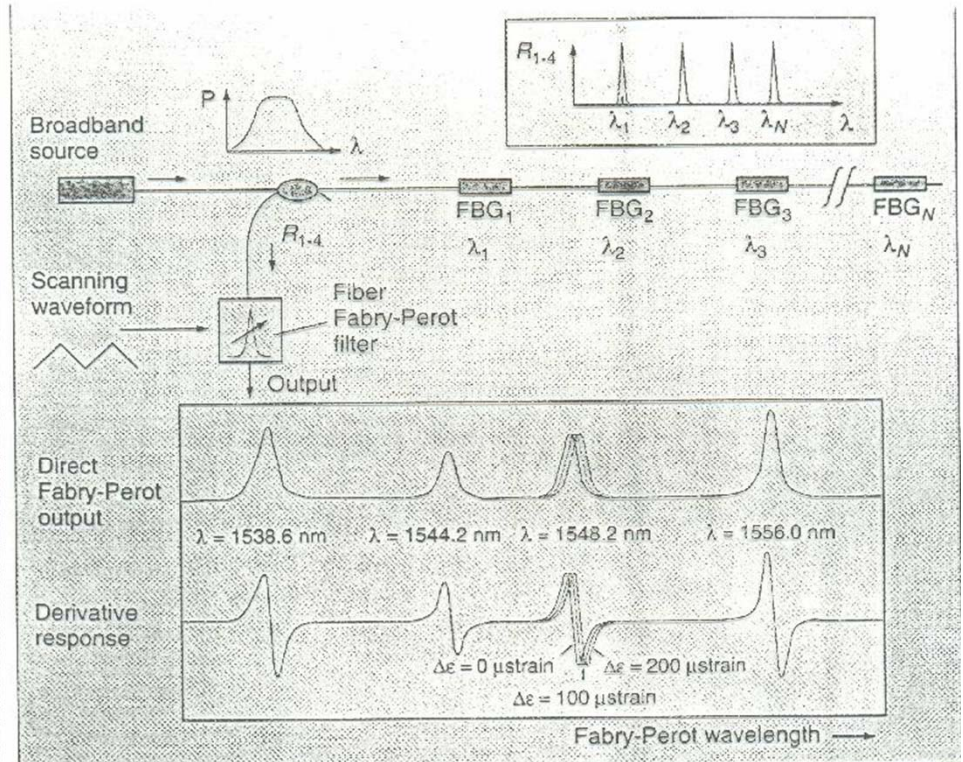


FIGURE 4. Multiple in-line sensors are interrogated in the wavelength-scanning mode as light reflected from the fiber-Bragg-grating (FBG) array is directed to the fiber Fabry-Perot filter that is swept in wavelength by a control voltage used to adjust the mirror spacing. Derivative signals improve the Bragg-wavelength shift and strain resolution (inset). Sensor 3, for example, is strained at 0-, 100-, and 200- μstrain levels.

Vlnodové přepínače a interferometry

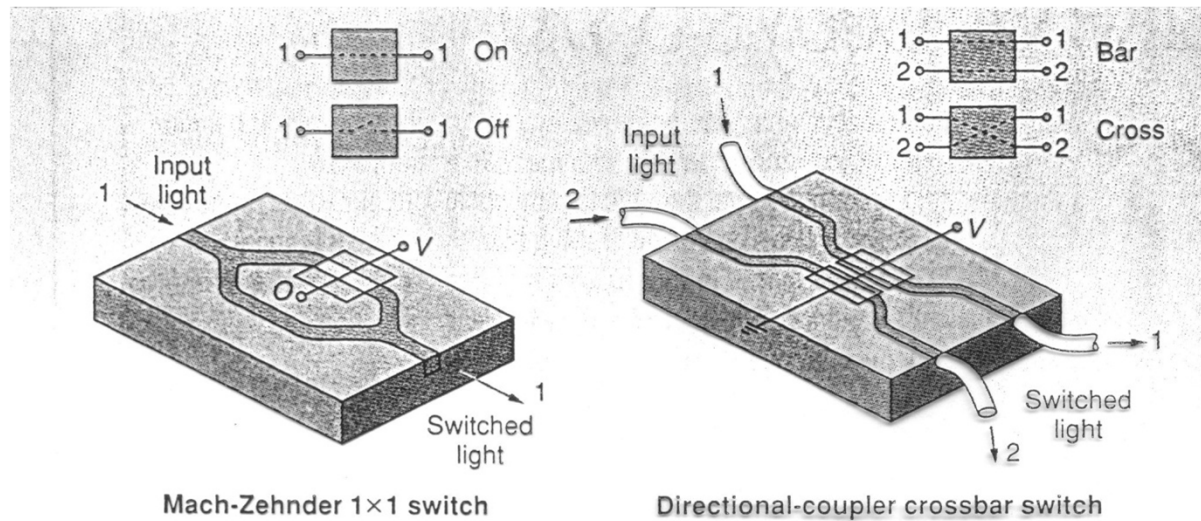


FIGURE 1. A 1×1 optical switch can be created from a Mach-Zehnder interferometer (left), while a directional coupler (right) defines a 2×2 optical switch. Both switches are electro-optically controlled and optoelectronically integrated. Note the two possible states of each switch.

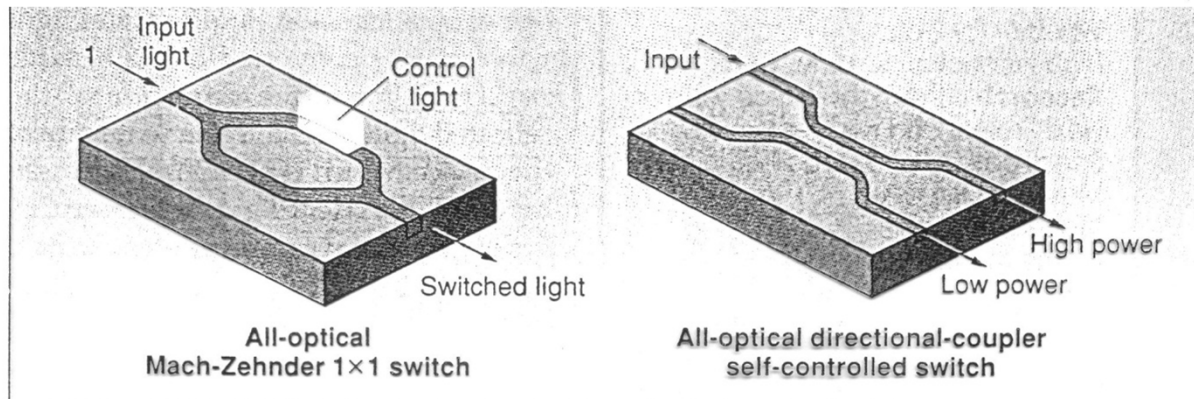
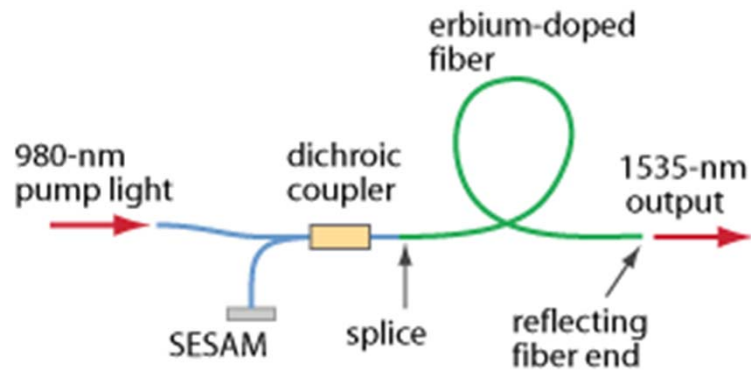
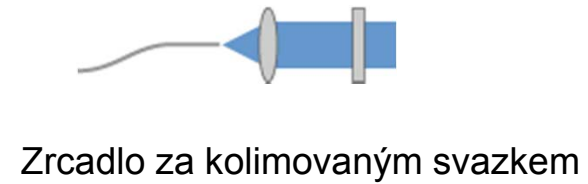
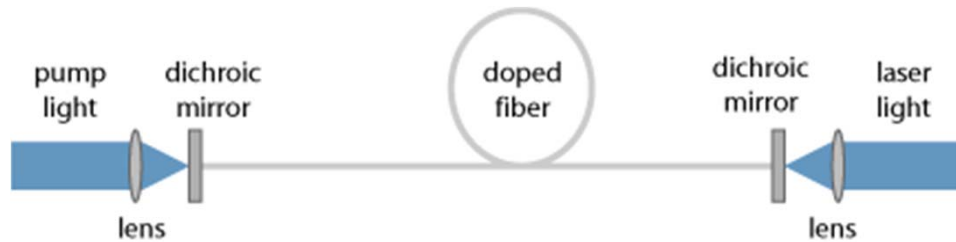


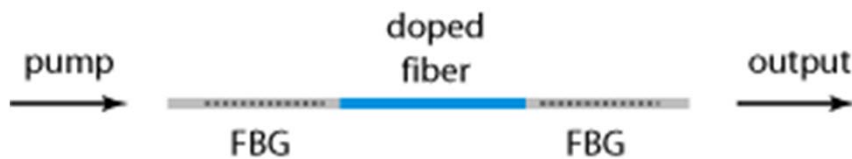
FIGURE 3. The Mach-Zehnder interferometer (left) and directional coupler (right) have been converted into all-optical switches by exploiting the optical Kerr effect. Other nonlinear effects and devices also are possible.

Vláknové lasery

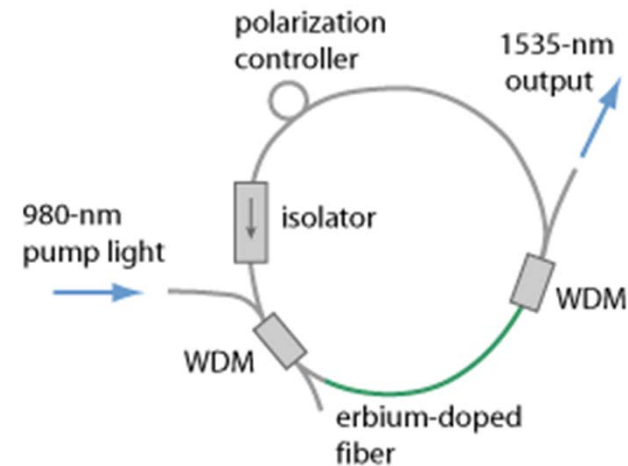
Aktivním prostředím je vhodně dopované optické vlákno. Tyto lasery prodělaly ohromný pokrok v posledních letech.



Odraz na konci vlákna tvoří výstupní zrcadlo

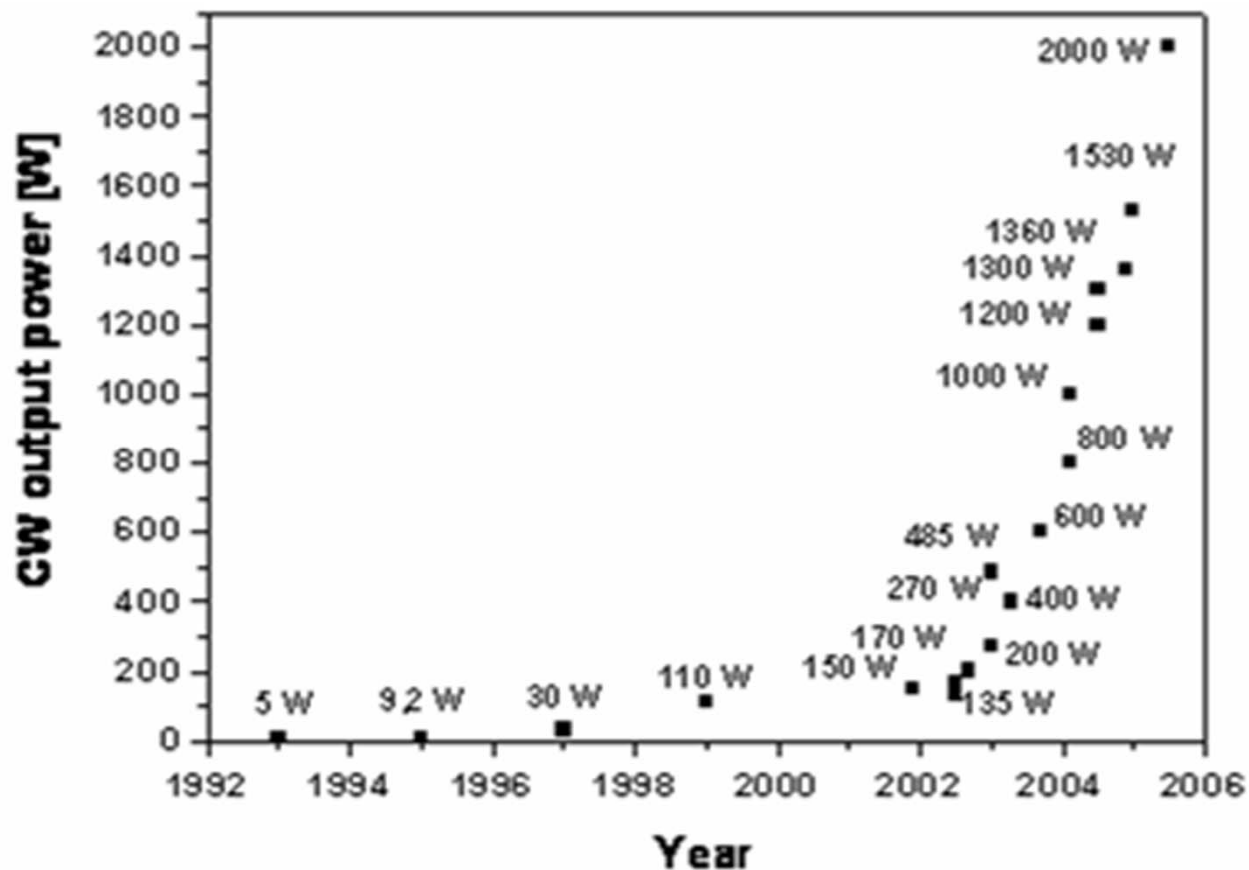


Vláknová Braggova mřížka (FBG)

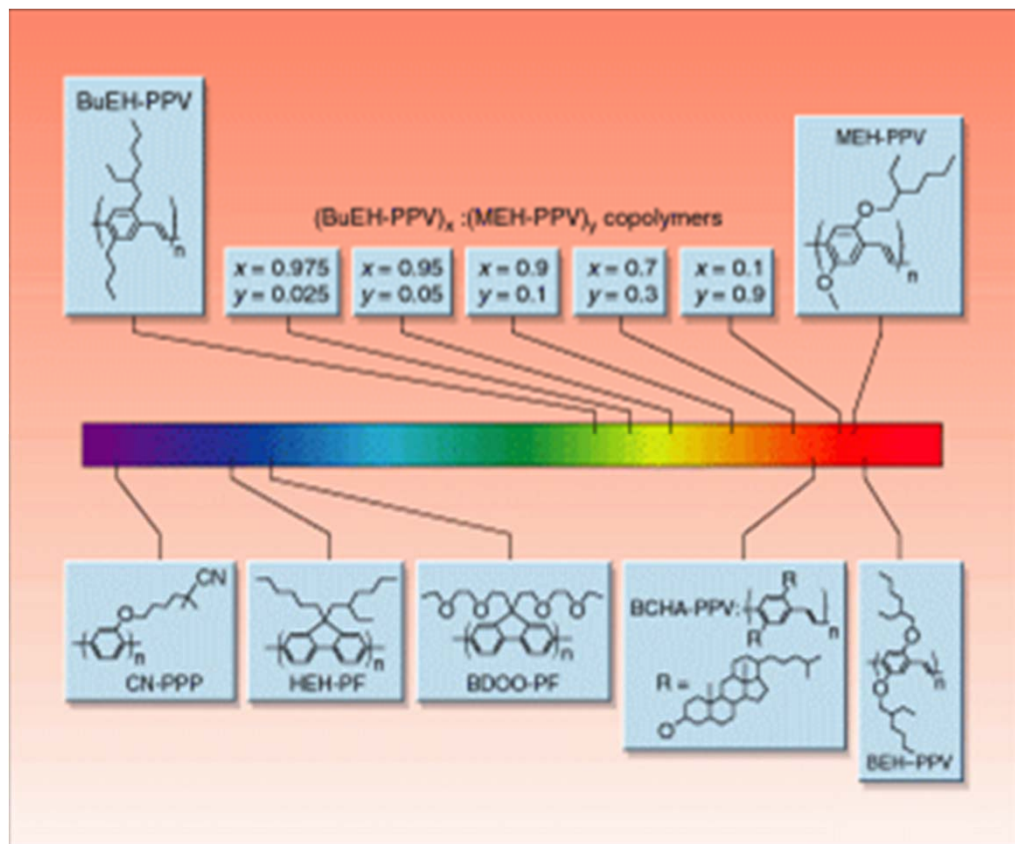


Vláknové lasery

Aktivním prostředím je vhodně dopované optické vlákno. Tyto lasery prodělaly ohromný pokrok v posledních letech.



Lasery na bázi organických polymerů



➤ nedávné době se dosáhlo velkých pokroků v technologii polovodičových polymerů, bylo nalezeno víc jak deset těchto polymerů, které lze opticky čerpat a jsou schopny stimulované emise na řadě vlnových délek přes celé viditelné spektrum

➤ jsou rozpustné pomocí běžných organických rozpouštědel, což umožňuje vytvářet tenké vrstvy.

➤ maximum absorpce je posunuté vůči maximu emise, což značí, že excitovaná hladina se neúčastní laserování a z hlediska teorie laseru jde o vícehladinový systém, který by měl umožnit funkční laser

Lasery na bázi organických polymerů

- kvantová účinnost polymerů nezávisí na jejich koncentraci (na rozdíl od laserových barviv) a dosahuje 70 %.
- tyto polymery dosahují téměř 90% absorpce na frekvenci přechodu na vzdálenosti 100nm!!! a rovněž jejich zisk na takto malé vzdálenosti je srovnatelný. Takže by mohly sloužit jako zesilující prostředí laserů dlouhé mikrometr
- jejich index lomu leží mezi 1,6 a 2,0 a tak je možné polymery umístit z obou stran skleněného substrátu (index lomu kolem 1,5). Spolu s rozhraním polymer vzduch dostaneme **planární vlnovod**
- experimentálně se prokázalo zúžení emisní čáry při dostatečném optickém buzení, což prokázalo přítomnost stimulované emise
- tyto polymery dosahují cca 1000x menšího optického výkonu pro zúžení emisní čáry než laserová barviva
- **polymerový laser** - tyto planární vlnovody sice zesilují, ale výstupní záření nemá žádnou modovou strukturu, je potřeba přidat rezonátor
- vzhledem k obrovskému zisku na jednotce délky můžeme uvažovat o mikrorezonátorech, např. konce vlnovodu opatřili zrcadly- braggovskou mřížkou (R=99%) a 60nm stříbrnou vrstvou, dosáhli jednomodového ostře směrovaného výstupu
- konstrukce laserové diody (nutnost elektrického čerpání) na bázi polymerů naráží na nutnost velkých budících proudů (cca 1000 A/cm²) pro generaci dostatečného počtu nosičů k dosažení inverze.

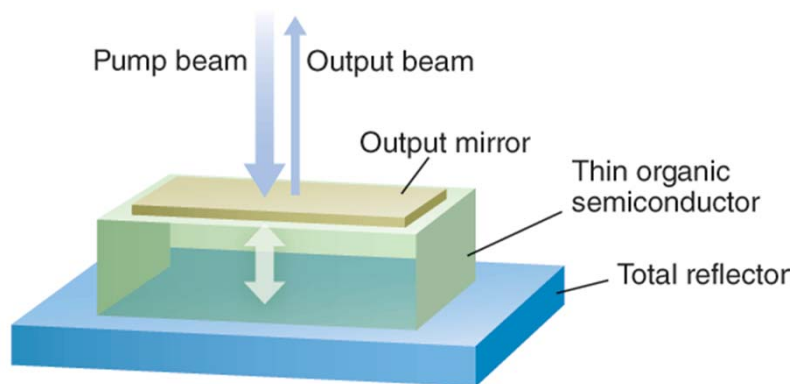
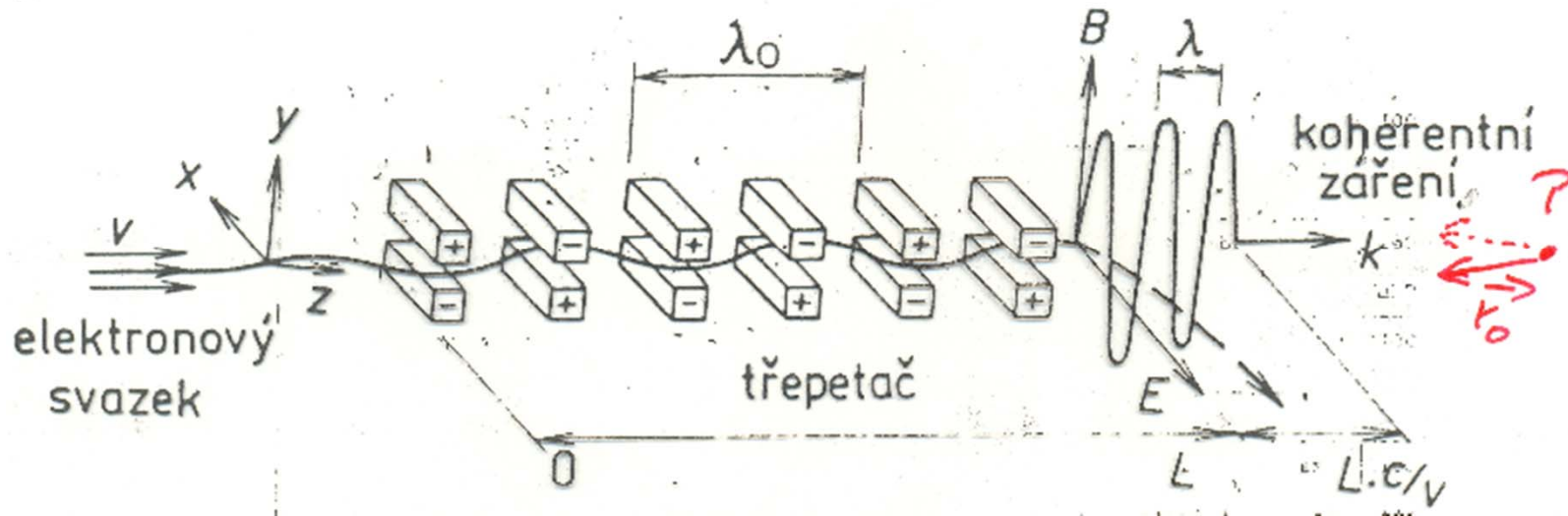


FIGURE 1. Optical pumping of a polymer thin film sandwiched in a Fabry-Perot cavity shows that gain can be high, but power is low because the cavity is very thin.

Lasery s volnými elektrony



➤ svazek relativistických elektronů prochází periodickým magnetickým polem, které nutí elektrony kmitat v příčném směru. Vzhledem k tomu, že se elektrony v tomto směru pohybují zrychleně vyzařují elektromagnetické záření. Každé periodě prostorové změny MG pole λ_0 odpovídá vlnová délka λ vysílaného záření $\lambda = \lambda_0 (c/v - 1)$. Je tedy mnohem menší než λ_0 . Elektrony vstupují do zařízení v různých okamžicích a každý vyzařuje vlnu s různou fází. Pokud je fázová rychlost vznikající EM vlny mírně odlišná od rychlosti elektronů a je-li vlna dostatečně intenzivní, pomalejší elektrony urychluje a rychlejší brzdí. Vytváří se pak elektronové zhustky, jejich záření již nemá chaotický charakter a zesiluje se takový typ vlnění, které elektronový svazek účinně brzdí, neboť dochází k přenosu energie z elektronů na vlnu. Uspořádání cívek se nazývá wiggler (třepač).

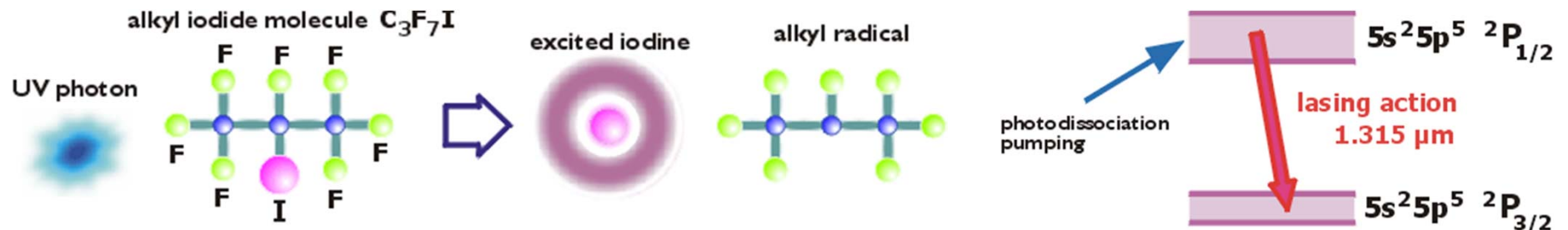
➤ poprvé postaven v r 1976 ve Stanfordu.

➤ vlnová délka může být od tisíců mm po stovky nm. Vyšší energie elektronového svazku vedou k nižším vlnovým délkám.

Laser PALS (Prague Asterix Laser)

Třetí největší fungující laserový systém v Evropě. Za 1DM převezen z Garchingu v roce 1997.

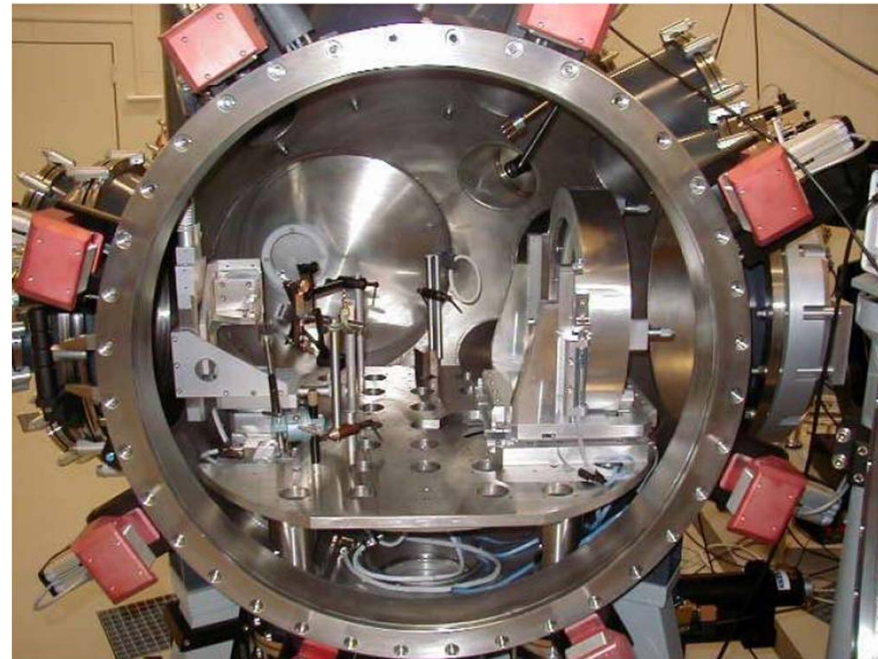
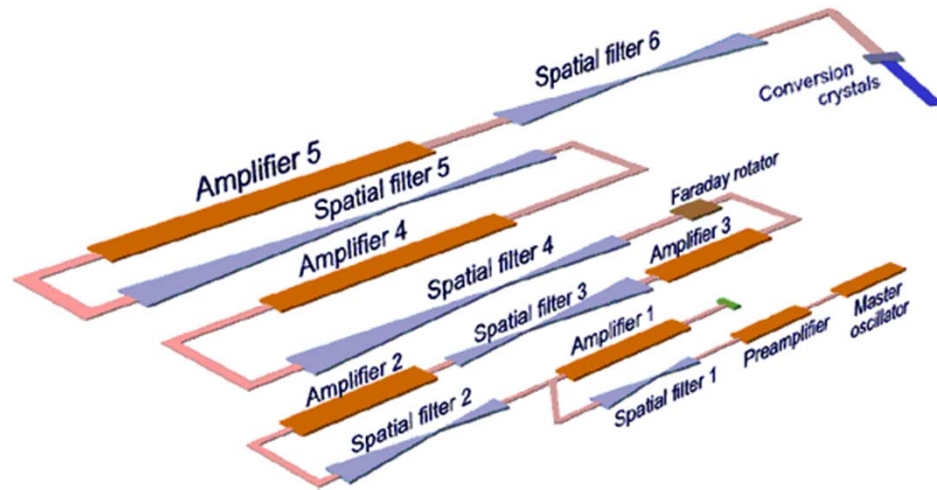
Základní vlnová délka	1315 nm (2ω i 3ω)
Délka pulzu	~ 0.4 ns
Maximální výstupní energie	1 kJ
Pulzní výkon	2 TW
Průměr výstupního svazku	29 cm



The iodine laser is pumped with energy released via photochemical reaction

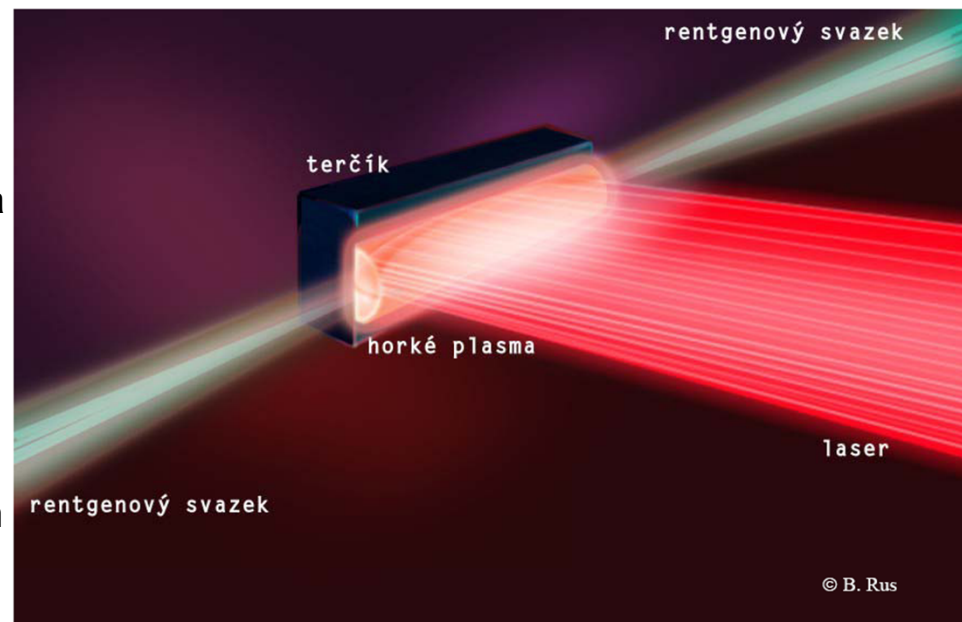
Asterix IV je plynový laser, v němž se využívá atomů jódu ke generaci záření v blízké infračervené oblasti, na vlnové délce 1,315 μm . Jódový atom je přitom získáván z mateřské molekuly alkylijodidu C_3F_7I fotochemickým procesem nazývaným fotodisociace (nebo fotolýza). Atom se uvolňuje z chemické vazby prostřednictvím pulsního UV záření dodávaného výbojkami. Elektronový obal jódu vystupujícího z fotodisociační reakce je excitován, čímž je automaticky zformována inverze populace vzhledem k níže ležícímu základnímu stavu. Tím jsou vytvořeny podmínky pro laserovou akci.

Laser PALS (Prague Asterix Laser)



X lasery

- je potřeba dosáhnout inverze populace na energ. hladinách vnitřních elektronových slupek atomů nebo na energ. hladinách jader. Idea pochází již z r 1967.
- problémem je vývoj efektivního zdroje buzení pro dosažení inverze v obsazení populace (rentgenové trubice, jaderný reaktor, jaderná roznětka), vhodné aktivní prostředí (vysokoteplotní plazma) a rezonátor (pro vlnové délky kolem 10 nm neexistují materiály s vysokou odrazivostí)- to lze obejít prostředím s vysokým ziskem a bez rezonátoru.
- záření v této oblasti lze generovat i metodami nelineární optiky s opakovaným násobením frekvence výkoného laseru, nebo dopadem fs pulsu.



Laserové plazma, vytvářené fokusovaným laserovým svazkem na pevném či plynovém terčiku, je zdrojem velmi krátkých, ale velmi intenzivních záblesků měkkého rentgenového záření. Ve zvláštním případě se může dokonce samotné laserové plazma stát rentgenovým laserem, vyzařujícím monochromatický a vysoce koherentní paprsek o bezkonkurenčním jasu. Lze toho docílit pomocí dvou laserových svazků, soustředěných nikoliv do jednoho bodového ohniska, ale do ohniska tvaru tenké čárky o délce několika centimetrů (tzv. lineární fokusace). Plazmový rentgenový laser je zcela novým nástrojem fyzikálního výzkumu, podstatně rozšiřujícím možnosti využití plazmových rentgenových zdrojů.

Příkladem je v laboratoři PALS nedávno vyvinutý zinkový dvouprůchodový rentgenový laser s jedním rentgenovým zrcadlem, který co do jasu, výkonu a stupně monochromatickosti zatím nemá ve světě konkurenci. Pracuje v oblasti velmi měkkého rentgenového záření, na vlnové délce 21 nm. Díky automatickému posuvu rentgenového zrcadla může laser generovat na jedno nastavení až sto pulsů, při výtečné reprodukovatelnosti parametrů výstupního rentgenového svazku (**výstupní energie několik mJ, délka pulsu typicky 100 ps, výstupní výkon minimálně 40 MW**). Laboratoř PALS tak může nyní nabídnout k využití svým kolegům nový unikátní instrument, vhodný jak pro fyzikální experimenty, tak i pro technické aplikace (např. pro interferometrické zkoumání povrchů s velmi vysokým prostorovým i časovým rozlišením).

X lasery

Do roku 2013 bude v Hamburku-Bahrenfeldu postaven za 1 miliardu EUR nejsilnější rentgenový laser na světě. Práce na jeho stavbě začaly v létě 2008.

Jde o evropský projekt, který má označení **XFEL**, což je zkratka názvu X-Ray Free Electron Laser. Na jeho realizaci se vedle SRN podílí 12 dalších zemí, a to nejen evropských.

Pro urychlování elektronů se bude ve XFEL využívat efektu supravodivosti - v této situaci ztrácejí částice při urychlení v elektromagnetickém poli při -271°C elektrický odpor, takže proud potom plyne bez jakýchkoliv ztrát. Svazky elektronů budou dovedeny až na hladinu 20 miliard elektronvoltů, načež budou pomocí 10 metrů dlouhých elektromagnetů rozděleny do několika tunelů. Pak se elektrony rychlostí světla budou po dráze připomínající slalom pohybovat v undulátoru, což je speciální magnetické zařízení. V undulátoru dojde k tomu, že elektrony ztratí svou energii, která se přemění v roentgenové záblesky. Některé záblesky elektrony urychlí, jiné je naopak zbrzdí. Přitom se elektrony zformují do kotoučů, jež paralelně produkují záření. Jeho síla bude podle jednoho z projektantů XFELu, Thomase Tschentschera, pokud dosáhne maximální hodnoty, vyšší než síla dnešních nejmodernějších roentgenových zdrojů v řádu miliard.

Vysoká intenzita záření a malá vlnová délka laseru umožní něco, co dosud nebylo možné: dosud bylo možno zkoumat většinou jen statické vlastnosti hmoty, a chemické reakce nikoliv, protože jejich průběh byl příliš rychlý na to, aby se daly řádně analyticky zkoumat. Teď tomu bude jinak, říká Tschentscher: díky velmi krátké expoziční době v řádu femtosekund (1 femtosekunda = 1 miliardtina vteřiny) lze zachytit činnost interagujících molekul v atomárním rozlišení pomocí jediného laserového záblesku. První laserový záblesk vyvolá fotochemickou reakci, druhý slouží k jejímu zachycení, zdokumentování. Série takovýchto momentek v různě nastavitelných časových úsecích mezi počátečním a konečným zábleskem pak podává přehled o celkové reakci. Takto je možno např. podrobněji poznat, jak probíhá fotosyntéza.

http://technik.ihned.cz/c4-10024800-27298190-800000_d-mega-projekt-xfel-v-hamburku-bude-nejsilnejsi-rtg-laser-na-svete

<http://xfel.desy.de/>

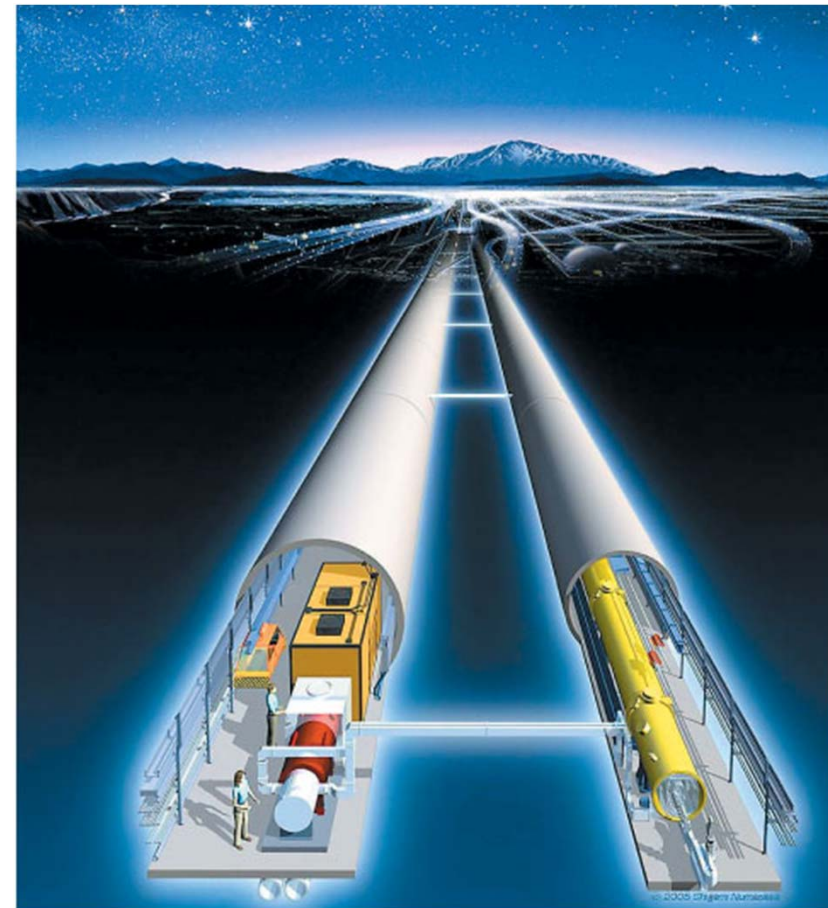
X lasery

Do roku 2013 bude v Hamburku-Bahrenfeldu postaven za 1 miliardu EUR nejsilnější rentgenový laser na světě. Práce na jeho stavbě začaly v létě 2008.

Parameter		Value	
	SASE 1	SASE 2	SASE 3
photon energy [keV]	12.4 - 4.0	12.4 - 3.1	3.1 - 0.2
wavelength [nm]	0.1 - 0.31	0.1 - 0.4	0.4 - 6.4
peak power [GW]	24	22	100 - 135
average power [W]	72	66	300 - 800
photon beam size (FWHM) [μm]	110	110	65 - 95
photon beam divergence (FWHM) [μrad]	0.8	0.8	3 - 27
bandwidth (FWHM) [%]	0.09	0.08	0.28 - 0.73
coherence time [fs]	0.3	0.3	0.3 - 1.9
pulse duration (FWHM) [fs]	100	100	100
number photon per pulse [$\times 10^{12}$]	1.2	1.1	20-430
average flux of photons [$\times 10^{16}/\text{s}$]	3.6	3.3	60-2600
peak brilliance [$\times 10^{33}$]*	5.4	5.4	1.7 - 0.06
average brilliance [$\times 10^{25}$]*	1.6	1.6	0.52 - 0.03

* in units of photons/(s mrad² mm² 0.1% bandwidth)

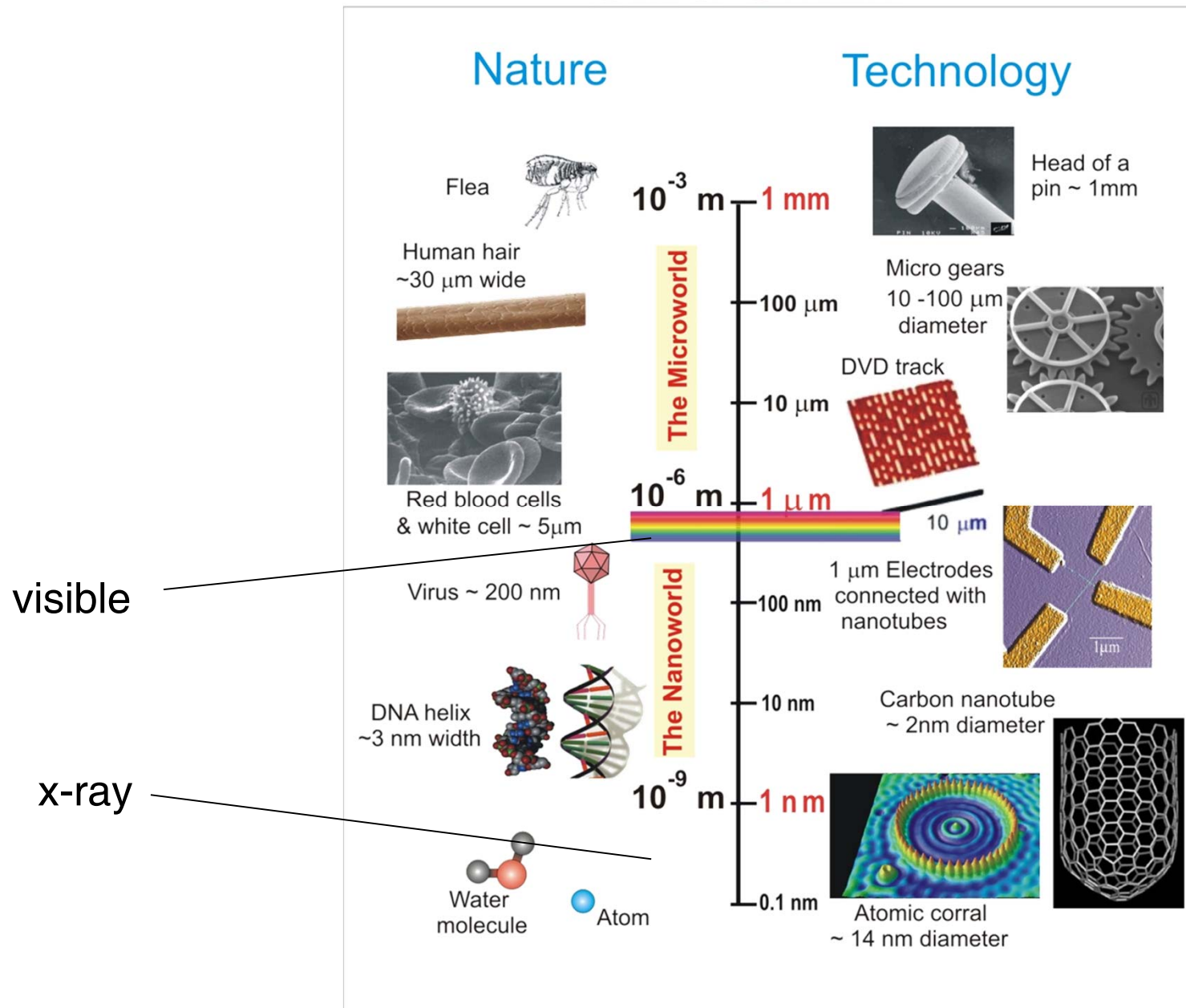
<http://xfel.desy.de/>



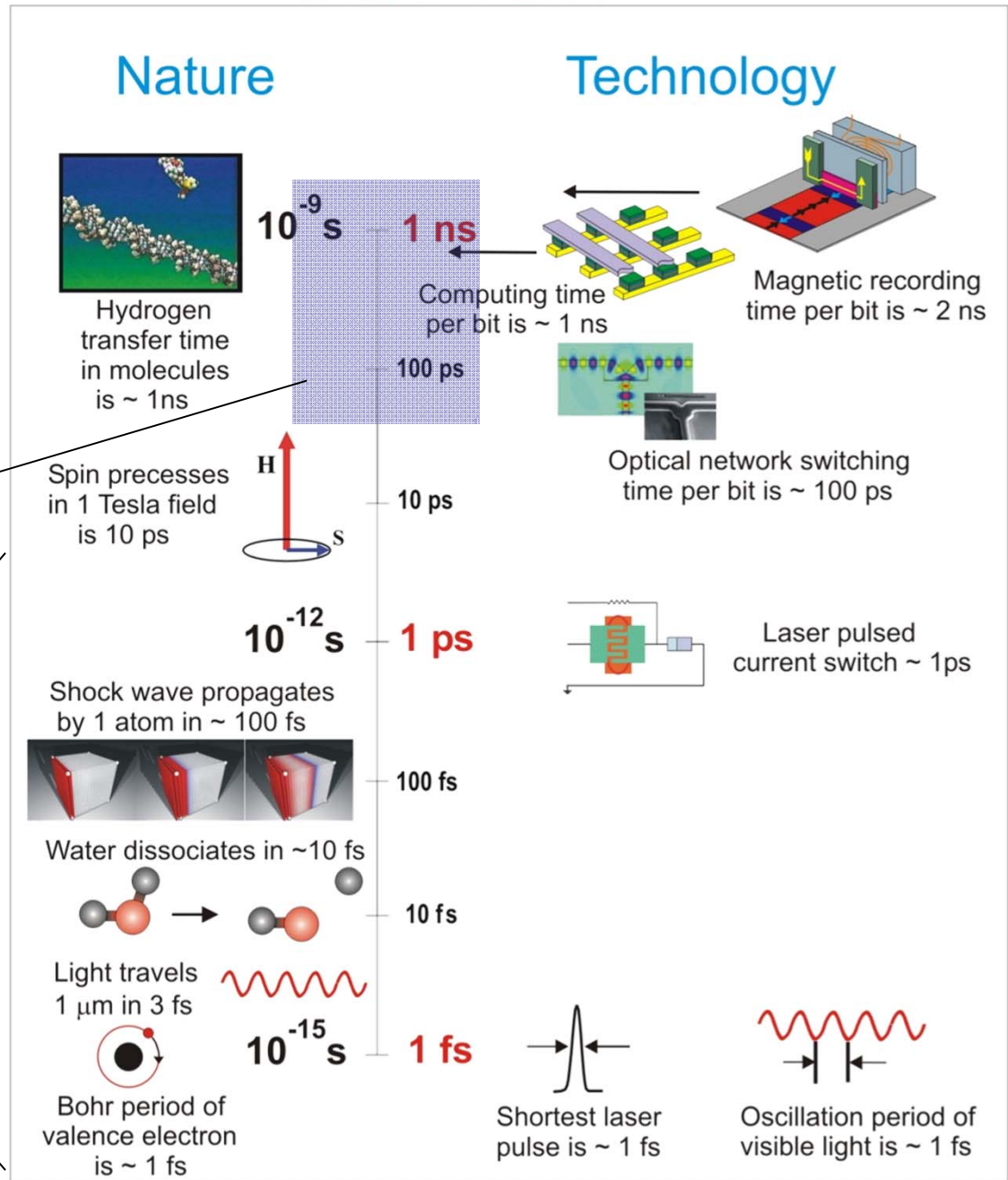
Vizualizace tunelů ILC: vlevo Klystron gallery (vlevo) urychluje kryomoduly (vpravo)

http://technik.ihned.cz/c4-10024800-27298190-800000_d-mega-projekt-xfel-v-hamburku-bude-nejsilnejsi-rtg-laser-na-svete

Proč krátké vlnové délky?



Proč krátké pulzy?



synchrotron source

new territory

Laserové statistiky

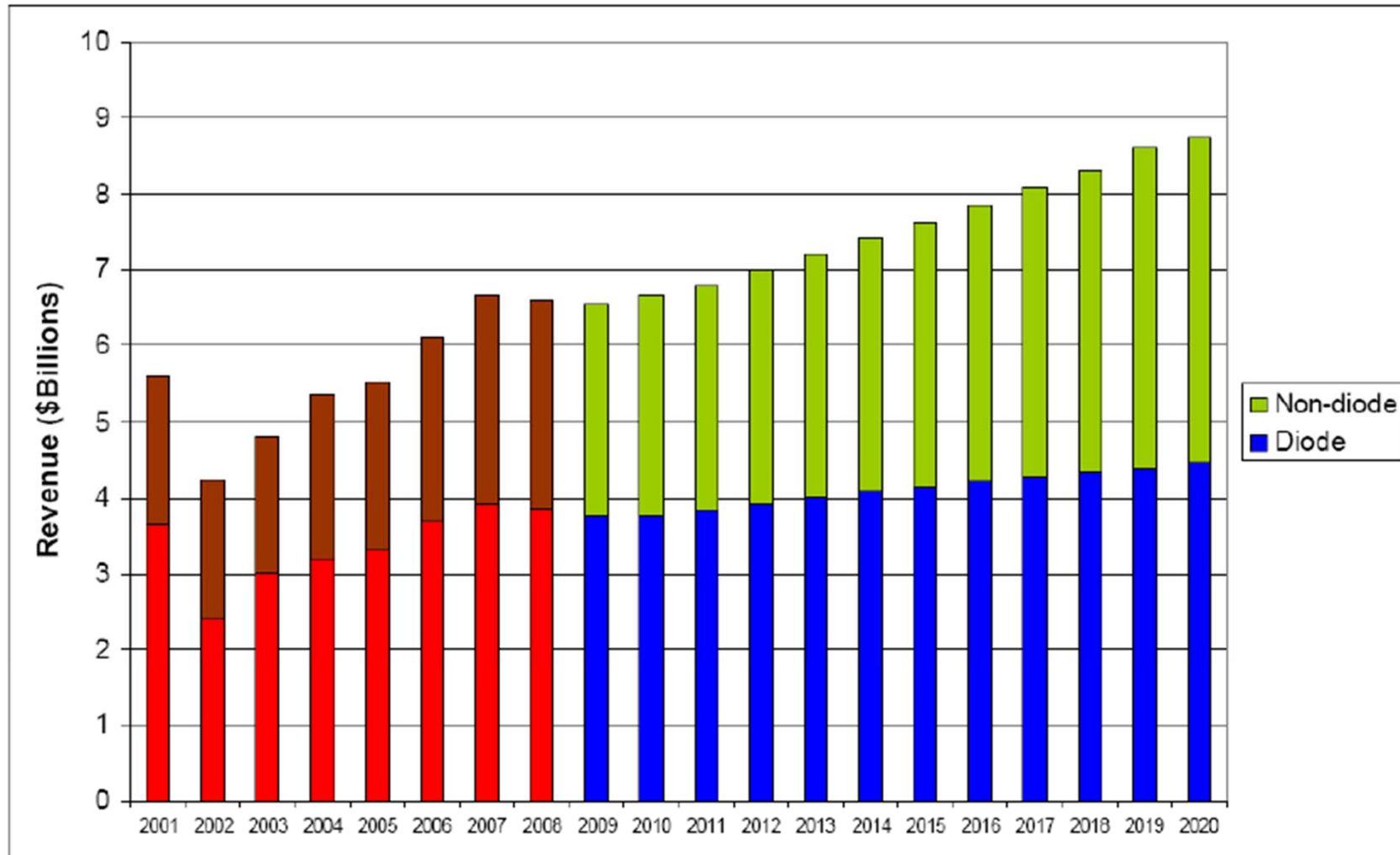


Figure 2.1: Global Commercial Laser Revenue Performance and Forecast, 2001-2020

Sources: IOA, Laser Focus World, OIDA, OIDA members

Laserové statistiky

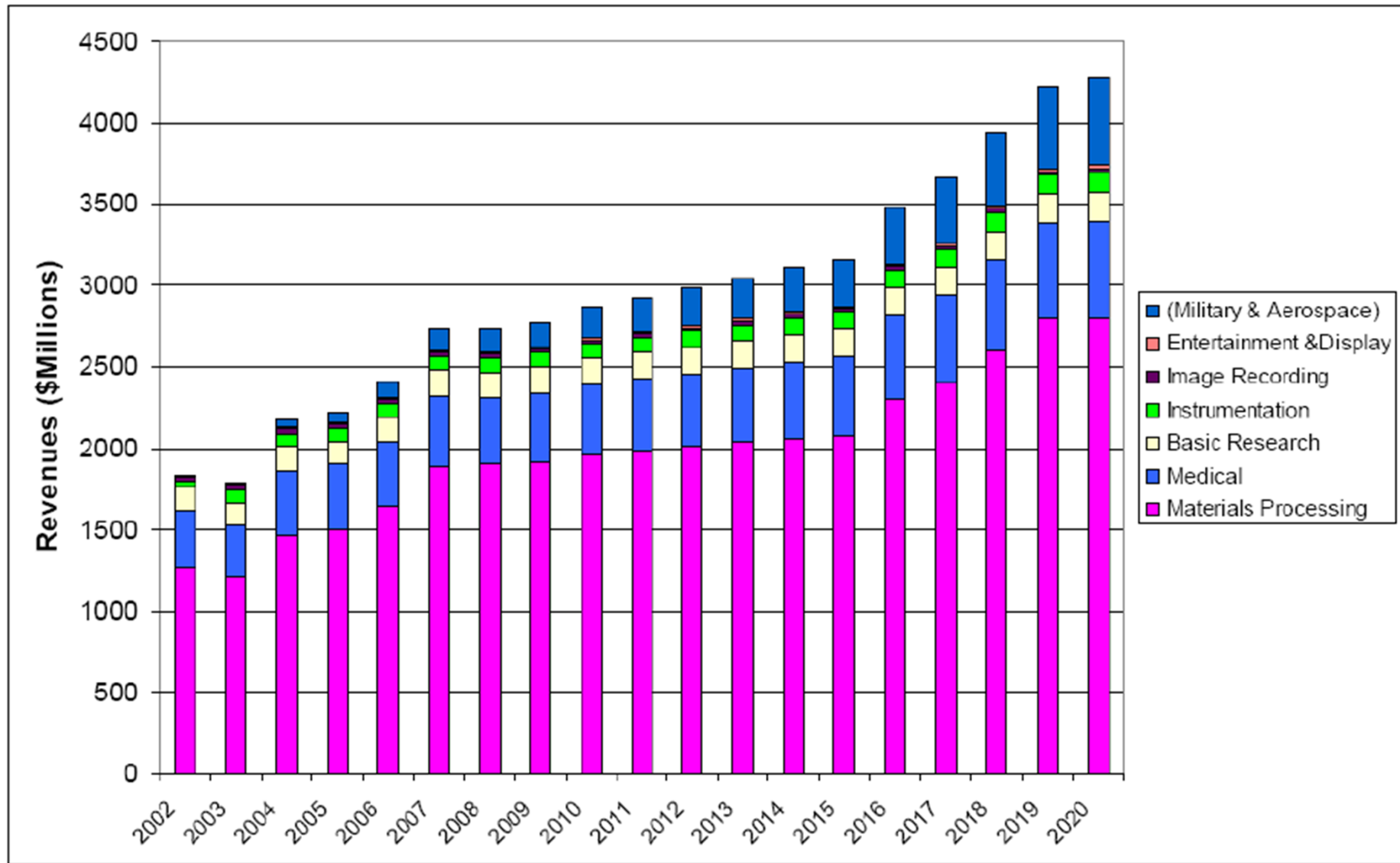


Figure 2.6: Global Nondiode Laser Revenue and Forecast by Key Segment, 2002-2020

Sources: IOA, Laser Focus World, OIDA, OIDA members

Laserové statistiky

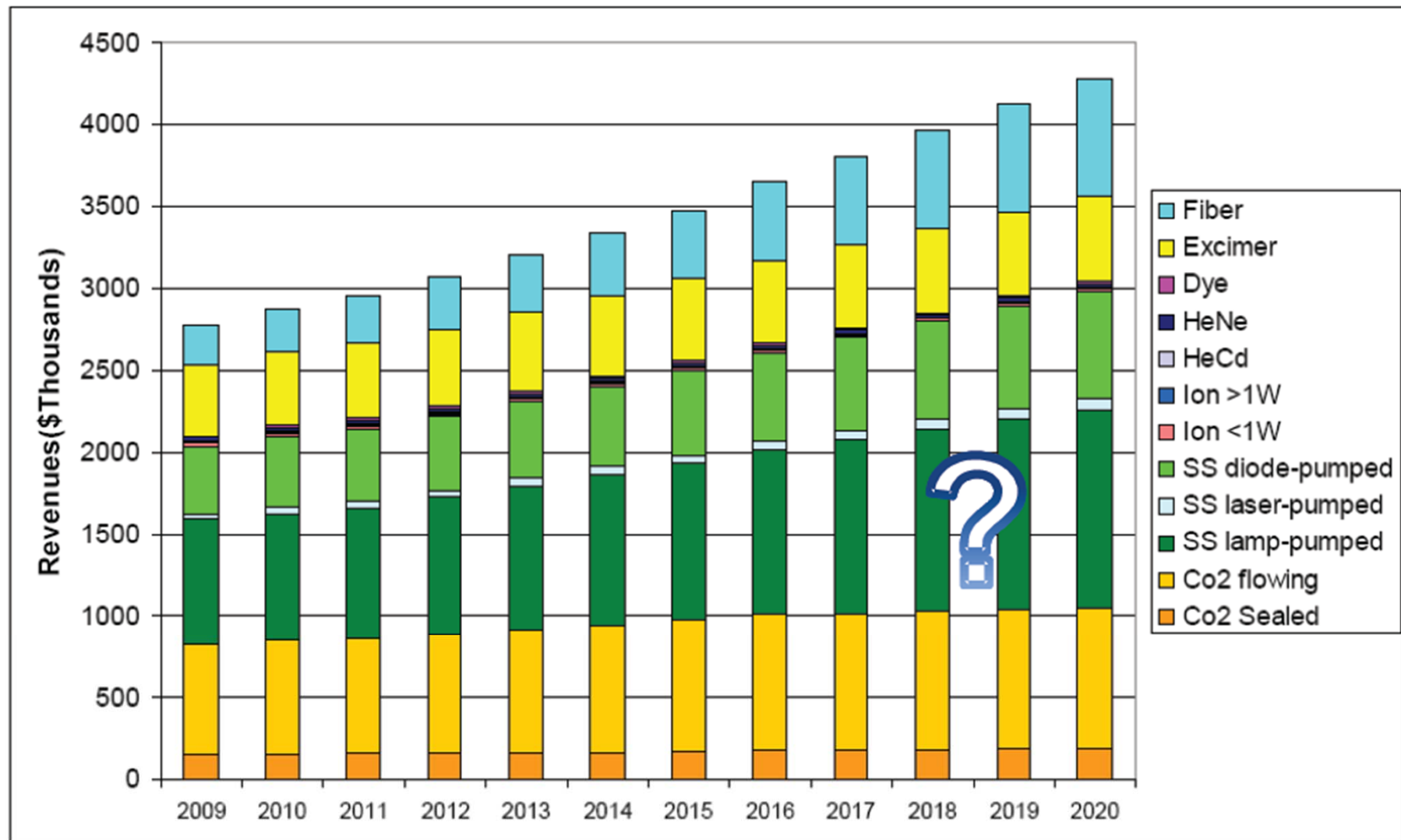


Figure 2.12: Nondiode Laser Revenue Forecast by Type, 2009-2020

Sources: IOA, Laser Focus World, OIDA, OIDA members

Laserové statistiky

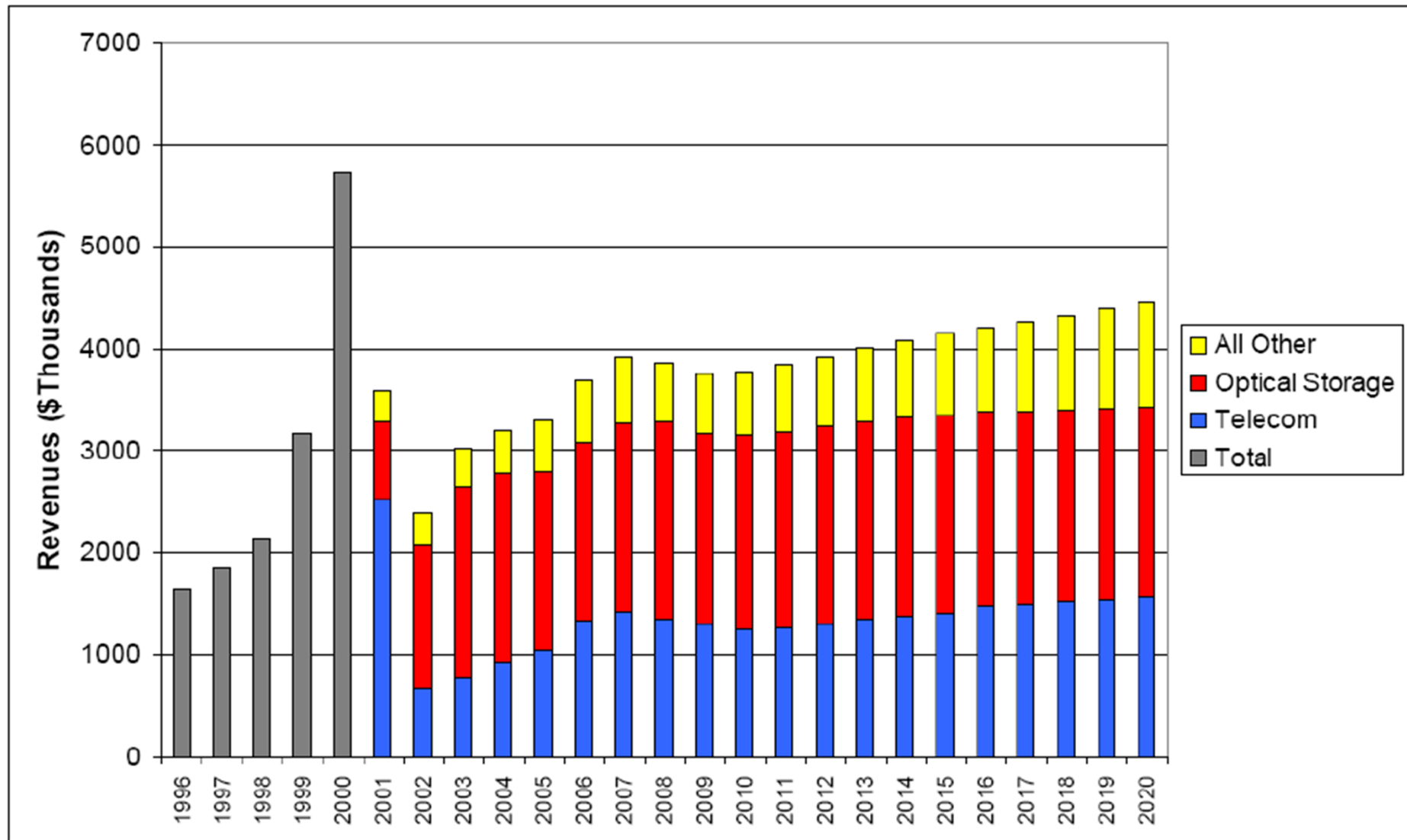


Figure 2.18: Global Laser Diode Market History, 1996-2020

Sources: IOA, Laser Focus World, OIDA, OIDA members, Pennwell

Laserové statistiky

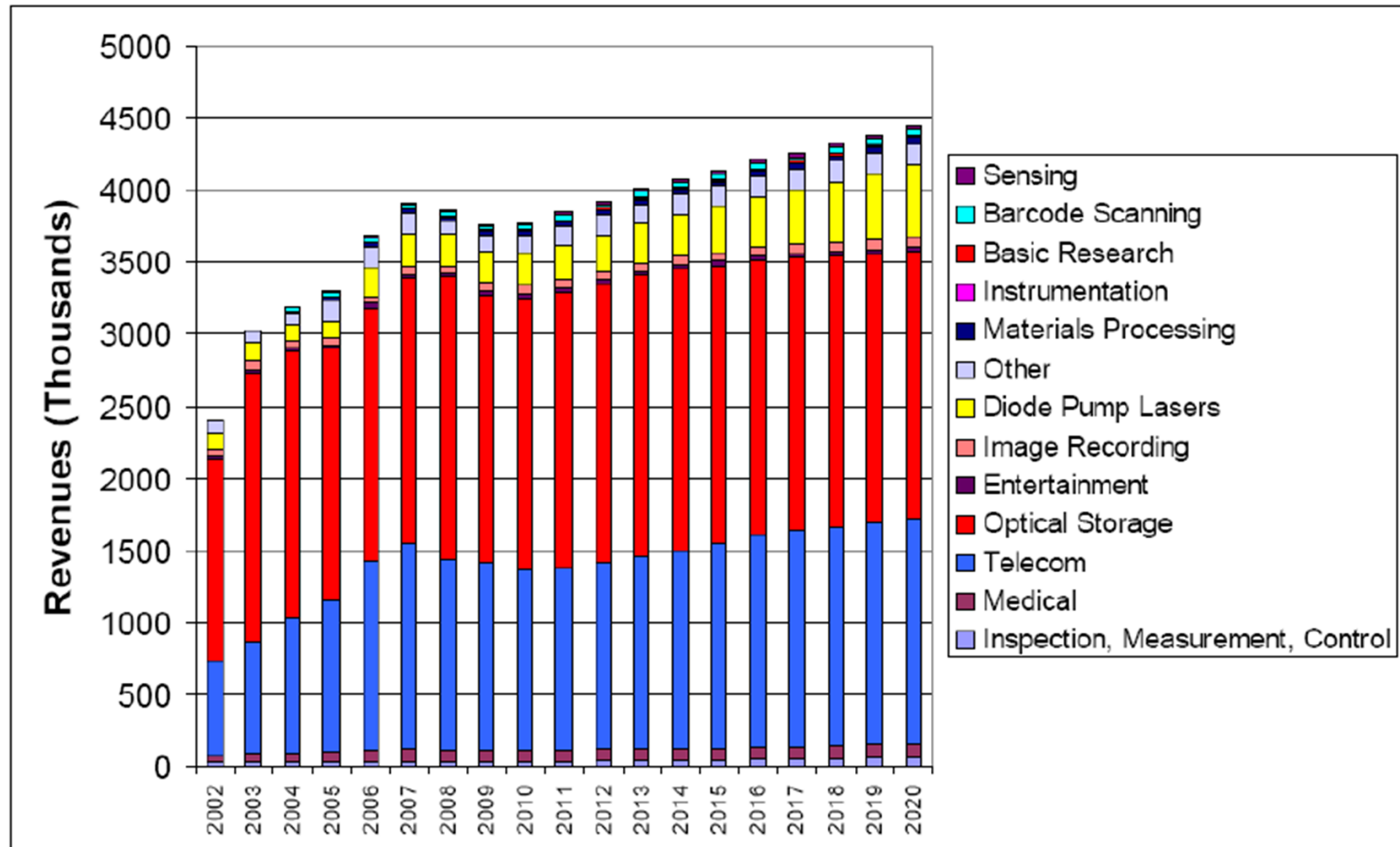


Figure 2.20: Global Laser Diode Revenue and Forecast by Segment, 2002-2020

Sources: IOA, Laser Focus World, OIDA, OIDA members