

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra výkonové elektroniky a strojů**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Laserové technologie v elektrotechnice**

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

1. Trumpf, The Laser as a Tool, Vogel Buchverlag, Würzburg, 280 s. ISBN-10 3-8343-3072-8.
2. JK Lasers: A GSI group company. Laser Drilling [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.jklasers.com/laser-drilling>.
3. PASCHOTTA, Rüdiger. An Open Access Encyclopedia for Photonics and Laser Technology. In: [online]. [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Navrátil**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
**Prof. Ing. Václav Kús, CSc.**  
vedoucí katedry

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2020/2021

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **David VLASÁK**  
Osobní číslo: **E18B0035K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Laserové technologie v elektronice**  
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

#### Zásady pro vypracování

1. Popište princip funkce laseru, uveďte typy laserů dle aktivního prostředí a jejich parametry, využití, výhody či nevýhody.
2. Zmapujte bezpečnost práce s lasery a bezpečnostní třídy laserů.
3. Uveďte příklady použití laserů v elektronice a ve výrobě elektroniky.
4. Zhodnoťte přínos laserových technologií.

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na využití laserů v elektrotechnice a zmapování jejich bezpečnostních tříd. Práce obsahuje popis biologických účinků laserového záření na zrak či kůži. V práci jsou popsány bezpečnostní postupy, které je nutné dodržet, aby nedošlo k poranění při používání laserů. Dále je zde vysvětleno, jaké výhody různé druhy laserů poskytují, kde se používají a je zde zmíněno také několik aplikací z oblasti laserů v elektronice a dalších odvětvích.

## **Klíčová slova**

Laser, koherentní záření, bezpečnost práce s lasery, třídy laserů, aktivní prostředí.

**Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the use of lasers in electrical engineering and the determination of their safety classes. The thesis presents biological effects of lasers on human sight or skin. It contains safety recommendations and procedures to be followed to avoid injury when using lasers. It also explains what advantages do different types of lasers provide, in which field they are used, and also mentions several interesting applications of lasers in electronics and other fields.

**Key words**

Laser, coherent radiation, laser work safety, class of laser, active environment

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 31.5.2021

David Vlasák

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Navrátilovi za cenné profesionální rady, trpělivost a připomínky, dále Ing. Romanu Hvězdovi za poskytnutí rozhovoru v budově ELI Beamlines. A nakonec mé rodině, příbuzným a hlavně mé žene za podporu a poskytnutý čas.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HISTORIE LASERŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>2 PRINCIP FUNKCE</b> .....	<b>14</b>
<b>3 TYPY LASERŮ</b> .....	<b>16</b>
3.1 AKTIVNÍ PROSTŘEDÍ.....	17
3.1.1 pevná látka.....	18
3.1.1.1 pevnolátkové lasery.....	18
3.1.1.2 polovodičové lasery.....	20
3.1.1.3 vláknové lasery.....	21
3.1.2 kapalinové.....	22
3.1.3 plynové.....	23
3.2 PULZNÍ A KONTINUÁLNÍ LASERY.....	24
<b>4 BEZPEČNOST PRÁCE S LASERY</b> .....	<b>25</b>
4.1 BIOLOGICKÉ ÚČINKY NA ZRAK.....	26
4.1.1 Bezpečnostní prostředky pro ochranu zraku.....	29
4.2 BIOLOGICKÉ ÚČINKY NA TKÁŇ.....	30
4.2.1 Bezpečnostní prostředky pro ochranu kožní tkáně.....	31
4.2.2 Technická opatření proti nechtěnému kontaktu s laserem.....	32
4.3 ROZDĚLENÍ LASERŮ PODLE BEZPEČNOSTNÍCH TŘÍD.....	33
4.4 TŘÍDA 1.....	34
4.4.1 Třída 1M.....	35
4.4.2 Třída 1C.....	35
4.5 TŘÍDA 2.....	36
4.5.1 Třída 2M.....	36
4.6 TŘÍDA 3R.....	37
4.6.1 Třída 3B.....	37
4.7 TŘÍDA 4.....	38
4.8 LEGISLATIVA.....	39
<b>5 APLIKACE LASERŮ</b> .....	<b>41</b>
5.1 V ELEKTRONICE.....	41
5.2 V PRŮMYSLU.....	44
5.3 VE VĚDĚ.....	45
5.4 VE ZDRAVOSTNICTVÍ A MEDICÍNĚ.....	47
5.5 OSTATNÍ APLIKACE.....	48
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>51</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>52</b>



## Úvod

Laser je v dnešním moderním světě jednou z nejdůležitějších a pro normálního člověka nejméně viditelnou věcí, bez které bychom už dnes jen velmi obtížně dokázali existovat. Jeho vlastností je dnes využíváno snad ve všech odvětvích, která si lze představit. Proto je dobré mít povědomí o tom, jak funguje, čím vším nám dnes a denně pomáhá a hlavně jaká jsou úskalí jeho použití. Jako spousta jiných technologií, totiž při nesprávném používání dokáže napáchat velké škody, ať už na majetku, tak i na zdraví. Proto je tato práce zaměřena na vysvětlení principu laseru, čím vším nám může pomoci a zároveň jak bychom se měli chovat, aby nedošlo k nebezpečným situacím.

## Seznam symbolů a zkratk

Tab. 1 Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol/zkratka	Název	význam
Násobné předpony		
μ	mikro	10 <sup>-6</sup>
n	Nano	10 <sup>-9</sup>
p	Piko	10 <sup>-12</sup>
f	Femto	10 <sup>-15</sup>
M	Mega	10 <sup>6</sup>
G	Giga	10 <sup>9</sup>
T	Tera	10 <sup>12</sup>
P	Peta	10 <sup>15</sup>
Použité zkratky a symboly		
λ	lambda	Vlnová délka
W	Watt	Jednotka výkonu
YAG	yttrium aluminum garnet	Pevnolátkový laser
YVO	Yttrium Vanadate	Pevnolátkový laser
He	Helium	Prvek period. tabulky
Ne	Neon	Prvek period. tabulky
Kr	Krypton	Prvek period. tabulky
Ar	Argon	Prvek period. tabulky
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	Sloučenina
KrO	Oxid kryptonový	Sloučenina
IR	Infra červené světlo	Elektromagnetické záření
UV	Ultra fialové světlo	Elektromagnetické záření
Lidar	light detection and ranging	Detekční zařízení
AEL	Accessible Emission Limit	Maximální přípustná emise
Pa	Pascal	Jednotka tlaku
LED	Light emitting diode	Luminiscenční dioda

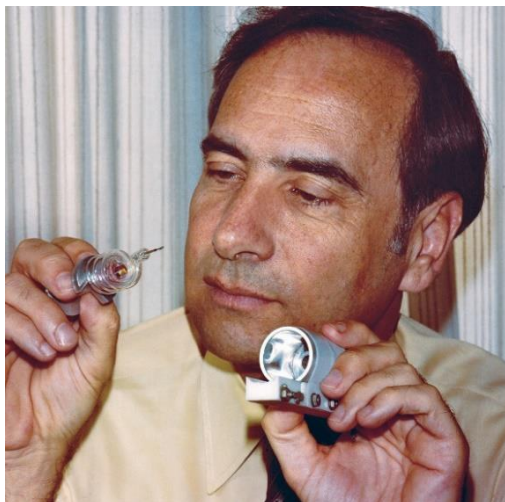
# 1 Historie laserů

Název LASER je akronym z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což volně přeloženo znamená 'světlo zesílené stimulovanou emisí záření'. Jedná se o zdroj elektromagnetického vlnění, které je nejčastěji v oblasti viditelného světla (vlnová délka  $\lambda = 380\text{nm}$  až  $780\text{nm}$ ), ale dnes už existují lasery vyzařující i v oblasti, jak ultrafialové ( $\lambda = 100\text{nm}$  až  $380\text{nm}$ ), infračervené ( $\lambda 780\text{nm}$  až  $1\text{mm}$ ), tak dokonce i v rentgenové části spektra ( $\lambda = 1\text{pm}$  až  $10\text{ nm}$ ). [1]

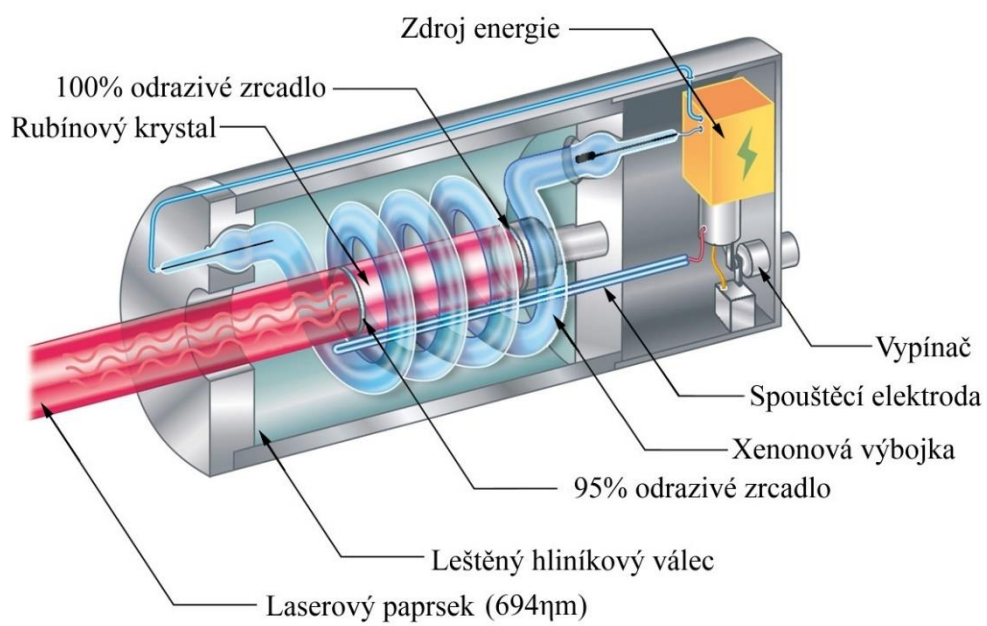
Teoretické kořeny laseru, ale najdeme už u Alberta Einsteina, který v roce 1917 přišel s myšlenkou tzv. stimulované emise záření: totiž že foton (částice světla) může za určitých okolností přimět atom nějaké látky, aby vyzářil nový foton o stejných vlastnostech, čímž dochází k zesílení světla. [1] [2]

Předchůdcem laseru byl MASER, což je akronymem z anglického Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. To znamená mikrovlnné záření zesílení stimulovanou emisí záření. Jedná se o zařízení, které generuje koherentní elektromagnetické záření na základě stimulované emise. Nejčastěji je využíván jako bez šumový zesilovač signálu v radioteleskopech či satelitní komunikaci, ale ho najít i v mikrovlnné troubě. [2]

Prvnímu laseru je dnes již více než 50let a jeho objev je přirovnáván k jednomu z několika největších objevů lidstva. První laser předvedl v roce 1960 americký vědec prof. Theodor Harold Maiman a byl založen na použití rubínového krystalu (obr. 1 a 2), který tvořil aktivní prostředí. Zdrojem energie byla xenonová výbojka a jednalo se o pulsní laser. [1]



Obr. 1 prof.Theodor Maiman a jeho laser (převzato z [3])



obr. 2 konstrukce prvního laseru

Malý výčet několika zajímavých časových milníků.

**1961** – první operace sítnice laserem

**1964** – vynalezení CO<sub>2</sub> laseru, to znamenalo obrovský pokrok ve strojírenství, díky velmi přesnému obrábění a svařování

**1970** – vědci zjistili, že optická vlákna dokáží velmi dobře přenášet i laser, tím začala nová éra komunikačních sítí

**1971** – pomocí laseru vznikl první mikroprocesor Intel 4004 s 2300 tranzistory, jen pro představu procesory i7 Haswell-E z roku 2014 (který je dnes už vlastně zastaralý) jich mají více než dvě miliardy!

**1973** – první komerční laserová tiskárna SLOT (*Scanned Laser Output Terminal*) od firmy Xerox.

**1975** – čtení čárových kódů, které se rychle rozšířilo do všech supermarketů v USA a později i do celého světa

**1978** – první laser disk, předchůdce kompaktního disku (CD), který byl vynalezen až o 4 roky později, znamenal obrovský posun v kvalitě zvuku i obrazu a hlavně nebyl mechanicky namáhán, tudíž nedocházelo k postupné ztrátě kvality

**1980** – vědci pomocí laseru dokázali poprvé manipulovat s atomy, tím se otevřel úplně nový svět pro kvantovou mechaniku

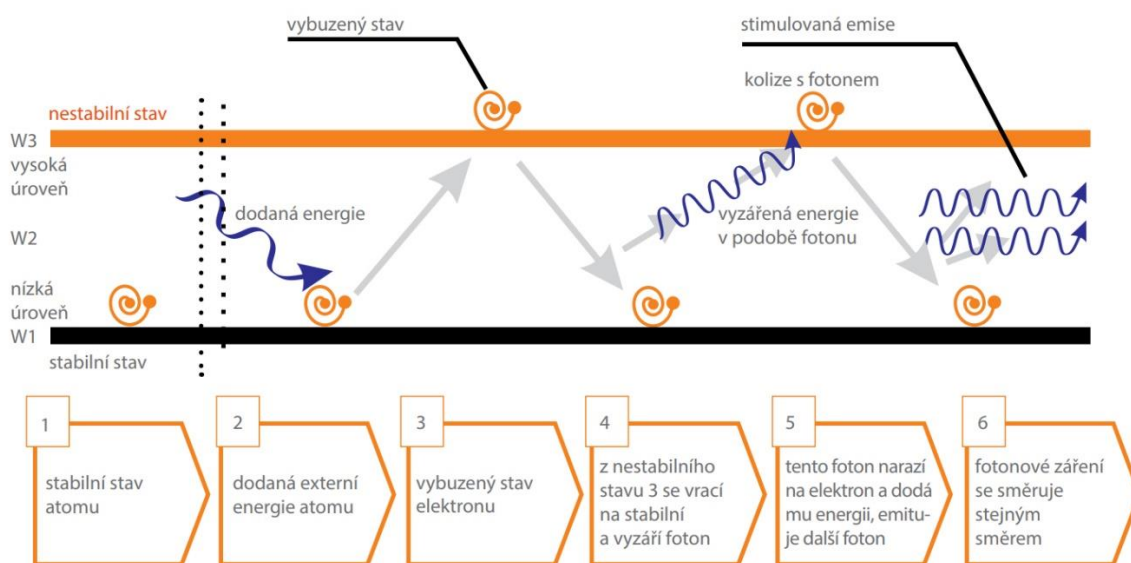
**1998** – laser byl oficiálně schválen pro oční chirurgii

**2013** – automobilka BMW jako první na světě montuje do produkčního vozu laserové hlavní světlomety

**2021** – čínská automobilka Xpeng (označována někdy též jako čínská Tesla) jako první na světě zavede lidar do sériové výroby, pro plně autonomní řízení. [10]

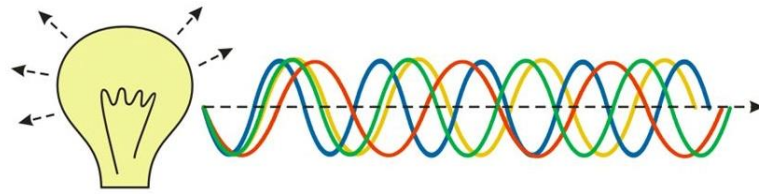
## 2 Princip funkce

Laser je tvořen aktivním prostředím (rubín, helium, CO<sub>2</sub>...), zdrojem energie (většinou výbojka nebo LED diody) a rezonátorem. Energie dodaná výbojkou excituje atomy aktivního média a povýší jejich elektrony do vyššího energetického stavu. Na této hladině však elektrony vydrží jen velmi krátkou dobu a poté se vracejí zpět na nižší energetickou hladinu. Při přechodu z vyšší energetické hladiny zpět na nižší se vyzáří energie ve formě fotonu. Tento jev nazýváme spontánní emise. Pokud do atomu ale před jeho spontánní emisí narazí další foton, dochází ke stimulované emisi. Vyzářený foton má pak stejnou frekvenci i fázi jako původní foton a vzniká tak koherentní záření. (obr. 3) Když tyto atomy umístíme mezi takřka dokonale kolmá zrcadla, z nich jedno je polopropustné dojde k exponenciálnímu násobení této energie a její vyzáření skrze polopropustné zrcadlo ven v podobě světla. Nejběžnějším typem rezonátoru je Fabryův-Perotův (obr. 2), který použil i Theodor Maiman. Tento rezonátor se skládá ze dvou rovinných navzájem rovnoběžných zrcadel z toho jedno je polopropustné a druhé plně odrazivé. [1] [4] [8]

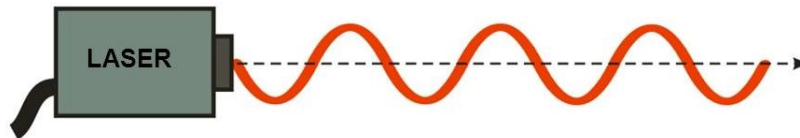


obr. 3 vlnová podoba světla (převzato z [4])

Hlavním specifikem laseru je, že jeho záření je monochromatické a koherentní. To znamená, že v ideálním případě vyzařuje na jediné vlnové délce (obr. 5), jedinou barvou a všechno jeho záření je ve stejné fázi. Tím se laser liší od ostatních zdrojů světla, neboť většina světelných zdrojů vyzařuje na několika různých frekvencích viditelného (i neviditelného) spektra a v různých fázích (obr. 4).



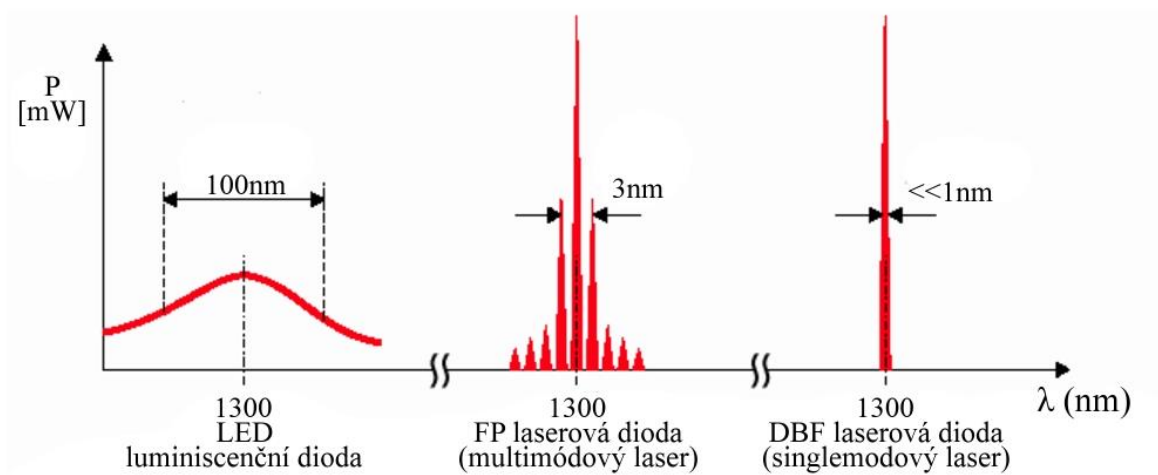
bílé světlo žárovky i slunce obsahuje všechny barvy (vlnové délky)



světlo laseru je monochromatické (jednobarevné) a koherentní (má stejnou fázi)

obr. 4 vlnová podoba světla (převzato z [5])

I když v reálném prostředí nikdy nelze dosáhnout úplné koherence, tak díky vysoké míře koherence dosahují lasery vysokého měrného výkonu vloženého do úzkého spektra (obr. 5).



obr. 5 spektrum laserové diody vs. LED spektrum (převzato z [8])

### 3 Typy laserů

Z následující tabulky (tab. 2) je zřejmé, že dělit lasery lze dle mnoha parametrů, v práci je dále popsáno podrobněji dělení laserů dle aktivního prostředí, jelikož aktivní prostředí předurčuje laser pro různé využití.

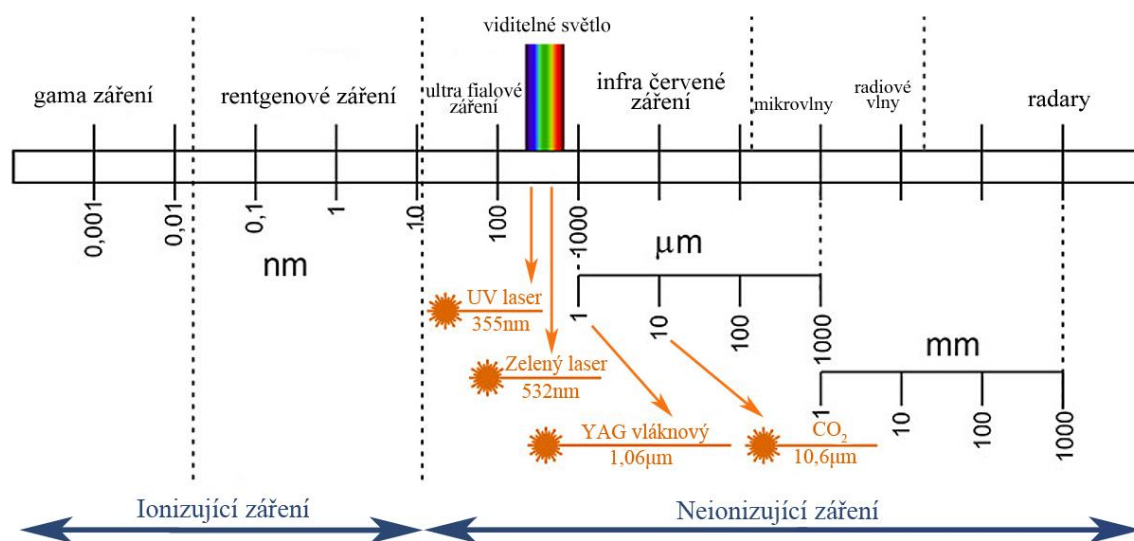
Tab. 2 možné třídění laserů (převzato a upraveno z [6])

<b>Třídění Laserů podle:</b>	
Aktivního prostředí	pevná látka - pevnolátkové, polovodičové a vláknové lasery kapalinové - fluorescein, rhodamin plynné - He-Ne, Ar, CO <sub>2</sub> , Kr, KrO
Vlnové délky	submilimetrové - 1 mm a více infračervené - 780 nm-1 mm ve viditelném spektru - 380-800 nm ultrafialové - 10 - 380 nm rentgenové - 1 pm -10 nm
Buzení (excitace)	optickým zářením elektrickým polem (výbojem) chemickou reakcí elektronovým svazkem tepelnými změnami rekombinací injekcí nosičů náboje
Počtu energetických hladin	dvou, tři a vícehladinové molekulární elektronové jaderné
Režimu práce	pulsní kontinuální (spojité) impulsní
Oblasti použití	průmyslové (řezání, vrtání, kalení, svařování,..) lékařské výzkumné vojenské (zaměřovací, útočné) technologické měřicí
Výkonu	malé výkony od 3W do 10W(100W) velké výkony 100W až do 100kW



### 3.1 Aktivní prostředí

Je jedna z nejdůležitějších součástí laseru a určuje nám, v jaké frekvenční oblasti bude laser vyzářovat (obr. 6), jakých výkonů může dosahovat a určuje, zda se bude jednat o laser pulsní, kontinuální, nebo bude umět fungovat v obou režimech. Aktivní prostředí je uzavřeno do optického rezonátoru, který zesiluje výkon a dochází zde ke stimulované emisi, tedy vzniku laserového záření. (obr. 3) Používá se několik druhů, (viz tab. 1). Úplně prvním byl krystal rubínu, který v roce 1960 použil prof. Maiman. Od té doby se začalo experimentovat s použitím i jiných látek, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností, které rubín nedokázal poskytnout. [6] [32] [51]



obr. 6 frekvenční spektrum

Z vlnové délky a výkonu lze dokonce spočítat množství vyzářených fotonů z laseru. Energie jednoho fotonu je úměrná Planckově konstantě a jeho frekvenci. Počet fotonů vyzářených za sekundu se spočítá tak, že se vydělí celková energie vyzářená laserem za 1 sekundu (tj. jeho výkon) energií jednoho fotonu. To vše, ale funguje za předpokladu, že foton se bude pohybovat rychlostí světla a jeho klidová hmotnost je nulová. Znamená to tedy, že pokud je známa přesná frekvence a výkon, lze přesně spočítat počet fotonů. Například laser s vlnovou délkou 1064 nm a výkonem 30 W vyzáří  $3,517 \cdot 10^{24}$  fotonů za sekundu. [6]

### 3.1.1 Pevná látka

Lasery využívající pevnou látku jako aktivní prostředí dělíme ještě na 3 podskupiny: pevnolátkové, polovodičové a vláknové.

#### 3.1.1.1 Pevnolátkové lasery

Typickým zástupcem pevnolátkových laserů je rubínový laser, ten se dnes již takřka nepoužívá a je nahrazován krystaly syntetickými, oproti prvnímu laseru nejsou rudé barvy, ale růžové. Kdysi velmi používaná xenonová výbojka (jako zdroj energie) je dnes už také na ústupu, místo ní se stále ve větší míře používají LED diody nebo dokonce, u velkých výkonů diody laserové. LED a laserové diody mají oproti výbojkám větší účinnost a trvanlivost. Trvanlivost diodového ozařovacího bloku je maximálně 20000 hodin, kdežto výbojková lampa má trvanlivost nižší a to maximálně 5000 hodin. [20] Teoreticky lze k vybuzení laseru použít obyčejnou wolframovou žárovku, ale už kvůli její velmi nízké účinnosti se nepoužívá. Lasery využívající krystaly většinou fungují v pulsním režimu, kde pulsy jsou často jen několik femto-sekund ( $10^{-15}$  s), pro kontinuální použití (kapitola 3.2) nejsou rubínové lasery vhodné, mohlo by totiž snadno dojít ke zničení krystalu. Při větších výkonech je nutné už lasery chladit, což se nejčastěji dělá vodou nebo dusíkem. Klasický krystalový laser se dnes již většinou moc nepoužívá, výjimkou jsou hlavně lasery největších výkonů. Proto se nejčastěji setkáme s lasery polovodičovými nebo vláknovými. Nejvíce používaným pevnolátkovým laserem je Nd:YAG (nejčastěji 1064 nm), kde jako aktivní prostředí funguje izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu. Tento laser se často využívá při operaci očí, pro odstraňování druhotného šedého zákalu nebo pro snížení nitroočního tlaku. Další velmi používaný je Cr:YAG laser (vyzařující v IR oblasti), který je dopovaný ionty chromu. YAG lasery, lze oproti klasickému rubínovému laseru provozovat v pulsním i kontinuálním režimu. V kontinuálním režimu se dosahuje výkonu většinou maximálně několika stovek wattů, v pulsním to může být násobně výše, ale pouze po velmi krátkou dobu (řádově jednotky pikosekund). [6] [42] Vyzařovaný svazek světla lze u YAG laserů efektivně řídit pomocí Q-switche. Jedná se o součástku, která se umísťuje na výstupní stranu uvnitř rezonátoru a je schopná převádět kontinuální vyzařovaný svazek na pulsy o vysoké energii. Může měnit délku pulsu na jednotky pikosekund o velkém výkonu v řádech kW (GW) nebo naopak na dlouhé několika sekundové pulsy o výkonu jen pár mW. Frekvence spínání může být řádově ve stovkách kHz. Q-switche jsou principiálně dva druhy a to aktivní a pasivní, aktivní ovládáme elektronicky a pasivní jsou závislé na výkonu laseru.

Pokud není aktivní Q-switch aktivován, tak není ovlivněn rezonanční obvod a vytváří se kontinuální laserový paprsek z emitovaných elektronů, při jeho aktivaci se paprsek přerušuje. Funkci lze nejnázorněji popsat na proudu vody, kterému do cesty dáme své dlaně. Ty nám vytvoří jakousi hráz (akumulátor), když následně dlaně rozevřeme, voda z nich vyteče s větší energií a ve větším množství. Tím jak dlaně dáváme k sobě a od sebe měníme frekvenci pulsů a množství nahromaděné vody, což představuje energii laserového paprsku. [20] [42] Stejně jako rubínové, tak i YAG krystaly je třeba chladit, jinak by mohlo dojít k jejich přehřátí a destrukci. Dnešní krystaly se většinou vyrábí ze speciálního čistého skla a jiných dielektrických materiálů. Výhodou skleněných krystalů je, že je lze vyrobit s velmi vysokou kvalitou a zároveň je lze dopovat velkým množstvím prvků, třeba neodymem, krystal pak vyzařuje v IR oblasti. Rezonátor (odrazivá komora) pevnolátkových laserů se velmi často skládá z dvou kruhových nebo eliptických vypouklých zrcadel. V případě eliptického zrcadla se do jedné dutiny umístí krystal a do druhého zdroj budícího světla. Aby se co nejvíce omezily ztráty, měla by být odrazivost celé komory co největší, přesto se některé paprsky ze zdroje vůbec nemusí dostat do krystalu, jiné se mohou částečně utlumit. Účinnost takovýchto laserů je velmi malá (maximálně jednotky procent). Což je dáno kvalitou odrazivých ploch rezonátoru a také tepelným namáháním krystalu, který pak ztrácí účinnost. Tyto lasery se nejčastěji používají pro značení, gravírování či leptání. Ve větších výkonech (až stovky wattů) také pro vrtání, žíhání a svařování. Dále se uplatňují i ve zdravotnictví, vědě, biologii či ve vojenských aplikacích. [10] [12] [32] [42]



Obr. 7 krystaly Nd:YAG laseru (převzato z [21])

### 3.1.1.2 Polovodičové lasery

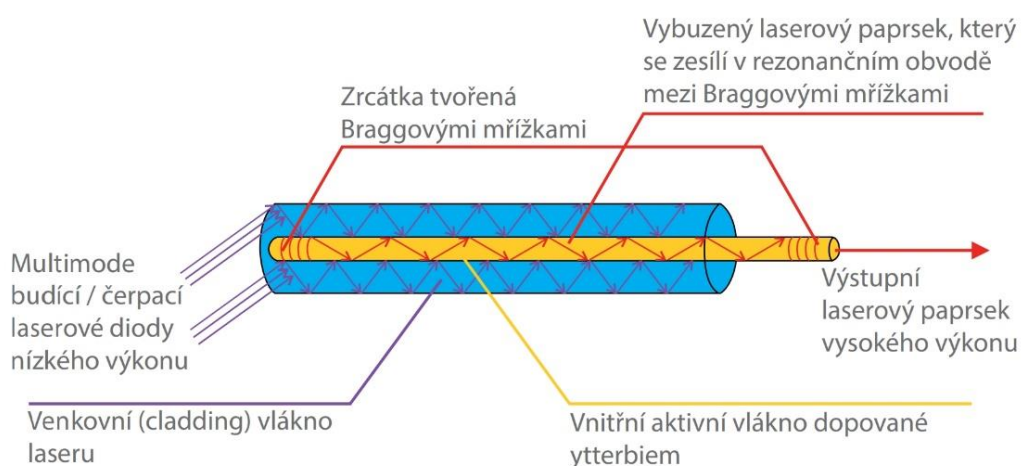
Polovodičové lasery dokáží být oproti ostatním druhům velmi kompaktní. (obr. 7) Samotná laserová dioda (čip) má často rozměry jen několik milimetrů, oproti nejmenším plynovým nebo kapalinovým laserům je to řádově stokrát méně. Aktivním prostředím tu je samotný polovodič nebo polovodiče příměsové. V nich jsou volnými nosiči k injektování buď elektrony nebo díry. Tyto lasery se vyznačují malými rozměry a velkou účinností, která dosahuje až 50%. Další výhodou je jejich velká spektrální šířka, mohou vyzařovat ve vlnových délkách od 300 nm až do 30  $\mu\text{m}$ . Naopak asi největší nevýhodou zůstává rozbíhavost vyzařovaného svazku, což závisí hlavně na teplotě aktivního prostředí. To lze řešit třeba zavedením vyzářeného svazku do optického vlákna, čímž dojde k jeho zaostření nebo soustavou čoček, čímž se ale nutně zvětší velikost laseru. Lze je dělit podle jejich buzení a to na lasery buzené elektrickým proudem nebo s elektronovým svazkem. U polovodičových laserů buzených svazkem elektronů je aktivním prostředím nejčastěji: galium arsenid (GaAs), kadmium selen (CdSe) a kadmium sulfid (CdS). Existuje i injekční polovodičový laser, u kterého je aktivní prostředí tvořeno polovodičem typu P a N. Odrazivé plochy rezonátor jsou tvořeny přímo broušenými stranami polovodičového materiálu nebo je odrazivost řešena odštěpením polovodičového materiálu podél krystalických ploch. Tím vzniká na rozhraní velký index lomu a dochází k takřka dokonalému odrazu. Laserové diody nižšího výkonu (jednotky mW) jsou běžnou součástí spotřebních zařízení kolem nás. Najdeme je např. v DVD přehrávačích, v laserovém ukazovátku nebo v laserové tiskárně. Spolu s optickým členem se používá pro čtení čárových nebo jiných kódů v průmyslu nebo obchodu. Laserové diody o výkonech v jednotkách wattů používají pro gravírování nebo řezání běžných materiálů jako dřevo nebo plast. Díky jejich kompaktním velikostem jsou hojně používané v integrovaných obvodech. Modulace je možná v řádu GHz, což umožňuje použití v telekomunikacích v optických vlnovodech. [6] [35]



Obr. 7 velikost laserové diody v porovnání s mincí (dolarový cent) (převzato z [13])

### 3.1.1.3 Vlákňové lasery

Jsou vlastně pevnolátkové polovodičové lasery působící ve viditelném nebo IR spektru. Oproti klasickým pevnolátkovým, ale využívají optické vlákno k zesílení výkonu a ne jenom k jeho pasivnímu přenosu. Vlákňový laser si lze představit jako dva soustředné válce, jeden s velkým průměrem a druhý uvnitř toho velkého s menším průměrem. (obr. 8) Budící světlo (většinou LED diod) svítí do velkého válce a ten působí na vnitřní váleček, který zde tvoří aktivní prostředí. Vnitřní vlákno je dopováno aktivními prvky, což je většinou erbium, ytterbium nebo neodym. Výsledný svazek, který vznikl uvnitř vlákna, má jinou vlnovou délku, než mělo světlo budících diod. Velikou výhodou je, že vlákňové lasery mají díky ozařování LED diodami vysokou kvalitu paprsku. Lze je také používat jako vysoce výkonné optické zesilovače, tak že vstupní signál přivedeme na ozařující diody a tím ve výsledku dosáhneme vysokého výkonu, který může být i tisícinásobkem toho původního. Navíc nedochází ke změnám na výstupním signálu, ten je tedy identický jako vstupní a pouze zesílený. Zvětšení výkonu se dosáhne použitím více laserových diod. Jejich největšími výhodami je poměrně velká účinnost (cca 25%), často pouze vzduchové chlazení (dáno velkou plochou vlákna a malými ztrátami), kompaktnost, velmi kvalitní paprsek, dlouhá životnost (cca 10x větší než u pevnolátkových s krystalem), velká stabilita výkonu a v neposlední řadě také snadný přenos výkonu do zaostřeného místa. I když v budoucnu tyto lasery nedokáží nahradit všechny aplikace, tak jejich používání je stále častější a ve spoustě případů nahrazují pevnolátkové YAG lasery. Jejich použití je velmi podobné jako u jiných pevnolátkových laserů, tzn. sváření, obrábění, kalení, ale i gravírování nebo jen značení materiálů. [6] [11] [35] [38]



Obr. 8 konstrukce vlákňového laseru (převzato z [6])

### 3.1.2 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím jsou většinou roztoky organických barviv, díky tomu mají kapalinové lasery velmi snadnou spektrální přeladitelnost od 300 nm do 1500 nm. Aktivním prostředím je zde nejčastěji použit líh nebo destilovaná voda a v ní rozpuštěné příměsi, např. Rhodamin 6G, Rhodamin B, Fluorescein, Alizarin a různé Coumariny. Příměsi je možné také dokonce rozpustit ve skle, vzniknou tak různé typy „skleněných laserů“. Ty se velmi často budí světlem jiného laseru, například laserem dusíkovým, který generuje v oblasti UV nebo světlem z výbojky. Pokud je laser buzený výbojkou, je stejně jako pevnolátkový umístěn do odrazové komory. Při buzení laserem je uspořádání jiné, tento způsob buzení je využíván spíše pro speciální vědecké účely. Změna vyzařované vlnové délky je u kapalinových laserů velmi jednoduchá, do rezonátoru se umístí difrakční mřížka a jejím natáčením, lze měnit vlnovou délku vyzařovaného světla. Další možnost je použití optického hranolu, což je konstrukčně jednoduché a hlavně i levné řešení, na jeho výstupu si vybereme pouze tu část spektra, která je pro nás důležitá. Bohužel z důvodu degradace aktivního prostředí tepelným a světelným namáháním při buzení, není tento typ laseru moc rozšířen. Jeho největší výhodou tedy zůstává snadná přeladitelnost vlnové délky, proto jsou velmi často využívány ve spektrometrii. [6] [35]

### 3.1.3 Plynové lasery

Aktivním prostředím v trubici, bývají různé směsi plynů, nejčastěji se jedná o oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), helium (He) a dusík (N), dle použití je možno tyto plyny libovolně míchat v různých poměrech. K buzení těchto laserů se většinou používá xenonová výbojka nebo jiný vysokonapěťový doutnavý výboj. Výjimkou je třeba argonový laser buzený elektrickým proudem o malém napětí. Elektrody uvnitř trubice jsou velmi namáhány velkými proudovými rázy, musí proto být vůči nim velmi odolné, aby nedocházelo k nežádoucímu opotřebením. Neexcitované atomy jsou zde tedy poháněny přímo elektrickým proudem, což je společné skoro pro všechny plynové lasery. Vzhledem k tomu, že se trubice s aktivním prostředím velmi zahřívá, je třeba, aby byla vyrobena z teplotně odolného křemenného skla. Proto se plynové lasery prakticky neobejdou bez chlazení, jako chladící médium se používá nejčastěji voda, líh nebo olej. Pouze pro malé výkony (cca do 100 W) je možné použít vzduchové chlazení. Dalším řešením je průtok aktivního plynu, pak se skleněná trubka tak nezahřívá a je chlazená zevnitř. V kontinuálním provozu dosahují  $\text{CO}_2$  lasery velmi velkých výkonů v řádech až kW. V pulsním režimu dokonce i několik desítek TW. Plynové lasery nejčastěji svítí v IR světelném spektru s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$  nebo 9,4  $\mu\text{m}$ . Z dalších plynných laserů se používají často HeNe (helium neon) lasery, jejich výhodou je velmi malá rozbíhavost svazku, proto se dřív velmi často používaly pro zaměřování ať už v civilním nebo vojenském použití. Nyní je jako většinu plynných laserů nahradily polovodičové lasery. HeNe laser generuje záření v oblasti viditelného spektra (většinou 632,8 nm - červenooranžová), při které má výkon obvykle desítky mW. U HeNe laserů slouží neon jako aktivní prostředí a helium je pouze pro podporu reakce a jako zásoba energie. Najdeme ale i plynné lasery, které dokáží svítit žlutě, zeleně nebo také v IR oblasti, v té také dosahují většinou největších výkonů v až stovky mW nebo jednotky W. Výkon je závislý na tom, jaký použijeme tlak, směs plynů a také na tom jak dobrý máme rezonátor, respektive jak kvalitní použijeme zrcadla. Existuje veliké množství plynových laserů, pro příklad uvedu třeba argonový (modrý, zelený), jódový (viditelné, IR), dusíkový (UV), s měděnými parami (zelený). Velmi rozšířené jsou  $\text{CO}_2$  lasery ve strojírenství, kde jsou nejčastěji využívány pro řezání, sváření, kalení, vrtání, ale i třeba jen pro značení výrobků a jejich gravírování. [38] A však i tyto lasery začínají být často vytlačovány vláknovými lasery, které mají větší efektivitu a snazší zavedení paprsku na dané místo. [6] [35]

### 3.2 Pulsní a kontinuální lasery

Je třeba ještě zmínit rozdělení laserů na pulsní a kontinuální (spojité). Toto rozdělení nám dává informaci o tom, jakým pracovním režimem vyzařují světelný svazek. Každý laser má své specifické vlastnosti na základě jeho aktivního prostředí, které ho předurčují buď k pulsnímu nebo kontinuálnímu použití. Rozdíl je v tom, že pulsní lasery vyzařují veliký výkon (kilowatty a více) během velmi krátké doby, často v řádech nanosekund. Zatímco kontinuální lasery vyzařují spojité spektrum o stabilním výkonu, ale z pravidla o mnohonásobně nižším výkonu. Některé lasery ale dokáží fungovat, jak v pulsním režimu, tak kontinuálním, tím jsou třeba vláknové a Nd:YAG lasery. Při kontinuálnímu použití značně klesá jejich okamžitý vyzářený výkon, v závislosti na délce pulsu až milionkrát. U Nd:YAG laserů lze pro změnu z kontinuálního režimu na pulsní použít buď Q-switch, jehož funkce je vysvětlena v kapitole 3.1.1.1, nebo podobného efektu lze dosáhnout změnou délky trvání jeho buzení. Více méně všechny lasery s výkonem v řádech desítek kilowatt a více, pracují v pulsním režimu (často pouze jednotky nebo desítky pulzů za minutu). Je to z důvodu nebezpečí přehřátí jejich aktivního prostředí a zároveň dáno taky jejich příkonem a zatížením energetické soustavy. [6] [11]



## 4 Bezpečnost práce s lasery

Laserový paprsek, jakožto koncentrovaný proud fotonů o vysoké energii, může být obsluze či okolí nebezpečný. Samozřejmě nejen samotné laserové záření může být zdrojem nebezpečí. Laser (zvláště v průmyslovém použití) je totiž často energeticky vysoce náročné zařízení, tudíž je většina laserů spojena zároveň s vysokým elektrickým napětím (napájení pro výbojky), dále se často používají nebezpečné a velmi hořlavé chemikálie (glykol, etanol, metanol, hexan) [22], někdy jako aktivní prostředí někdy pro chlazení. U výkonných laserů je zároveň nebezpečí potenciálně explodující nebo implodující skleněné trubice obloukové lampy, s čímž i úzce souvisí též nebezpečí požáru. Při používání ve strojírenství unikají výpary, prach, ale i horké kapky roztaveného materiálu. Nebezpečné je také sekundární záření (např. UV nebo RTG záření), které vzniká interakcí laserového paprsku s materiálem. [8]

Každý kdo pracuje s lasery, by měl být proškolen a znát následující:

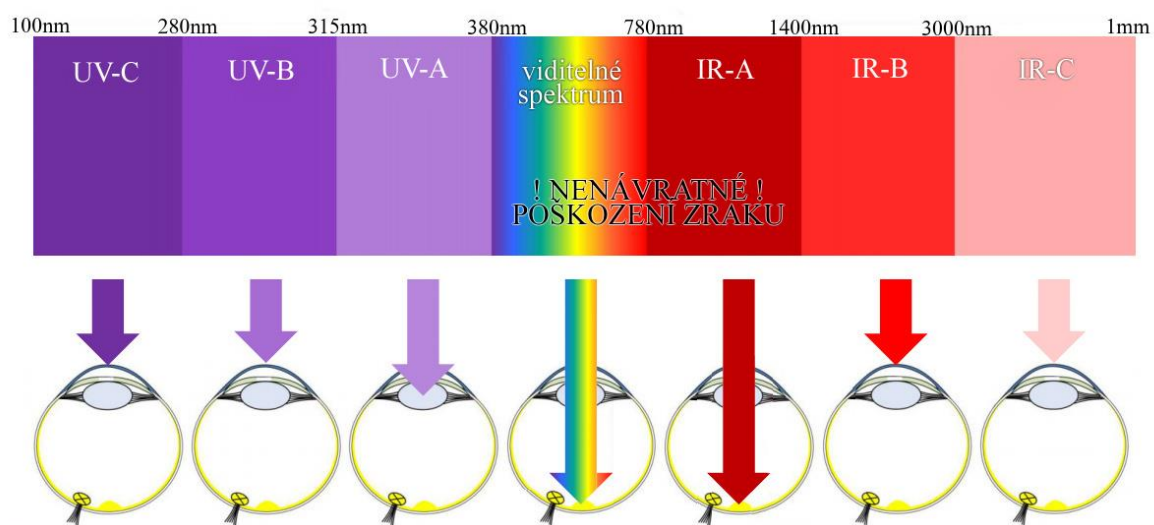
- co to laser je a jak funguje
- klasifikace nebezpečnosti laserů, jak předejít případným rizikům a o potřebě kontrolních opatření
- jaké nebezpečí hrozí pro oko a tělo
- jiná potenciální nebezpečí vyplývající z používání laserů
- nebezpečí od laserových zařízení nesouvisející přímo s laserovým paprskem

Dále je nutné znát některé povinnosti pro osoby zodpovědné za bezpečnost užití laserového zařízení:

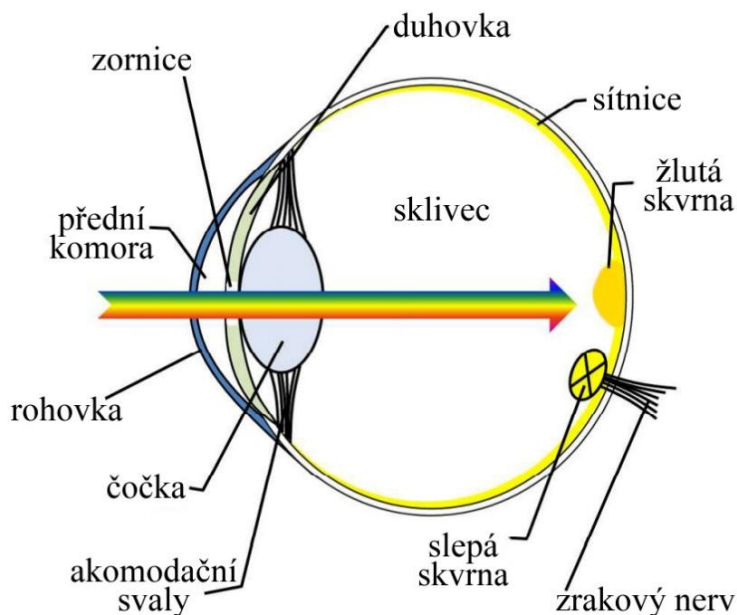
- školit pracovníky pro bezpečné používání laserů
- ujistit se, že laserové zařízení je správně nainstalováno
- ujistit se o správné klasifikaci laseru
- přečíst si návod výrobce pro správnou montáž a údržbu laserového zařízení
- omezit přístup do oblasti, kde je laser používán
- včas reagovat na známky poškození zařízení
- doporučit vhodné ochranné prostředky očí i těla

## 4.1 Biologické účinky na zrak

Nebezpečí zranění oka závisí nejvíce na výkonu a vlnové délce laseru. Oko se sice dokáže bránit reflexem (mrknutím), laserové světlo je ale natolik intenzivní, že dokáže oko poškodit daleko dříve, než oko stihne mrknout. Velký problém je totiž i ve skutečnosti, že lasery v UV nebo IR (CO<sub>2</sub> laser) spektru jsou pro oko neviditelné a tudíž obranný mrkavý reflex ani nevyvolají. Navíc oko jako takové nedisponuje nervovými zakončeními, tzn. oko necítí bolest. Může tedy docházet k nevratnému poškození oka, aniž by to zasažená osoba akutně pocítila. Na obrázku (obr. 9) vidíme různě intenzivní prostup do oka pro různé vlnové délky. UV-A až C laser nedokáže proniknout až na sítnici a je pohlcen již rohovkou nebo čočkou. To ale neznamená, že by nebyl pro oko nebezpečný. Může totiž způsobit zánět rohovky nebo fotochemický šedý zákal oční čočky. Lasery ve viditelném spektru a IR-A jsou nebezpečné asi nejvíce, snadno pronikají až na oční sítnici (obr. 10) a způsobují její nenávratné poškození. Při zásahu je na sítnici vytvořena slepá skvrna (místo necitlivé na světlo), nebo může být oko poškozeno celé, tzn. spálí se oční nerv. Může ale dojít i k fotochemickému či tepelnému poškození rohovky. IR-B a IR-C lasery opět neproniknou dovnitř oka a pohltí je rohovka, kterou mohou spálit nebo na ní vytvořit šedý zákal. [7] [15]

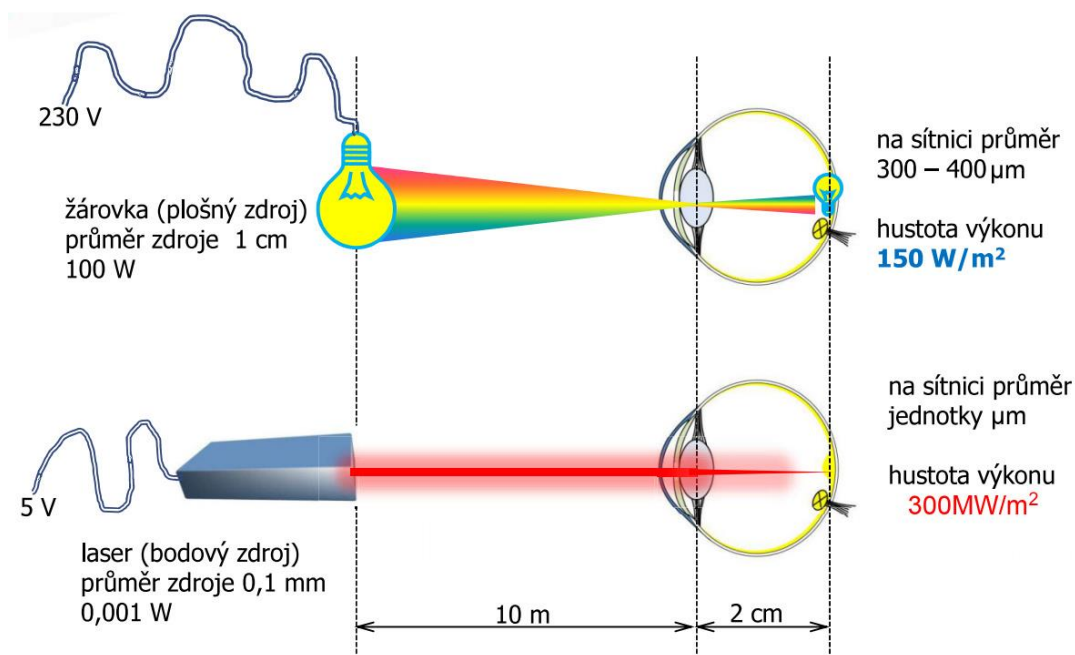


obr. 9 propustnost laserů do lidského oka dle jejich vlnové délky (převzato a upraveno z [7])



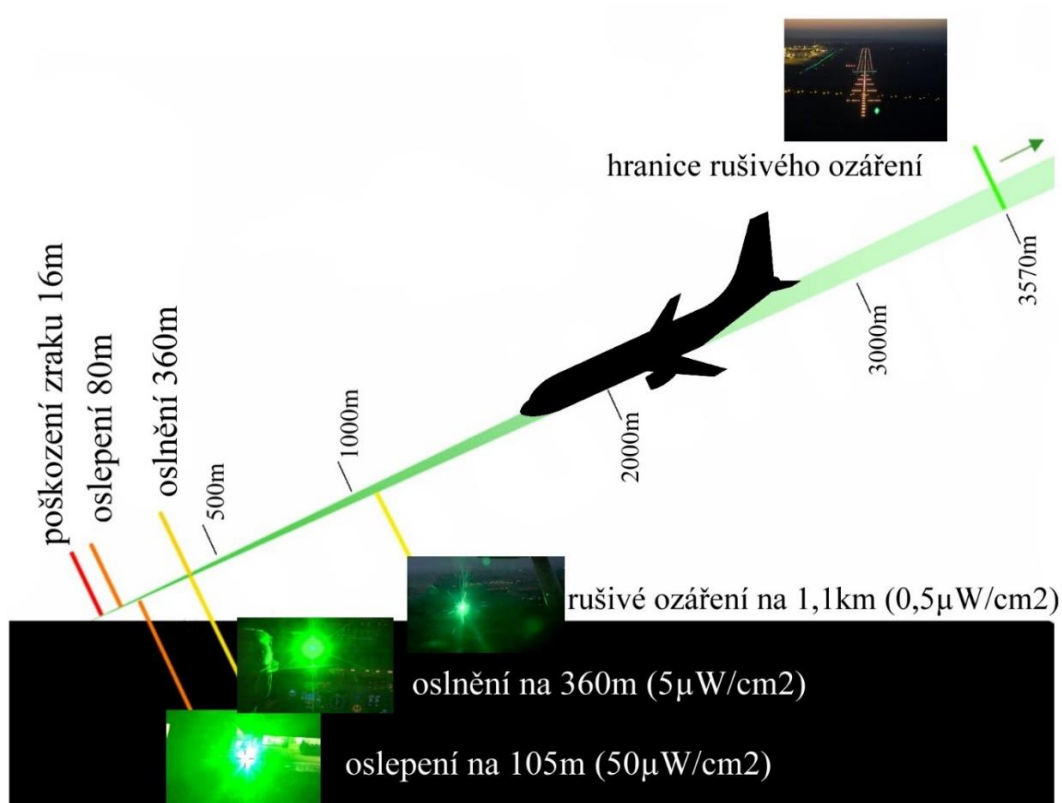
Obr. 10 lidské oko (převzato z [7])

Pro snazší pochopení nebezpečnosti laseru pro oko je nejmýmuvnější následující obrázek (obr. 11). Laser totiž při zaostření v oku dosahuje více než milionkrát většího výkonu vztaženého na plochu (pro uvažování laseru s výkonem pouhý 1 mW) než obyčejná 100W žárovka. Není asi těžké si představit, co potom dokáže přímý nebo i nepřímý pohled třeba do odrazu gravírovacího laseru, který si můžete bez problémů též pořídit domů a dosahuje výkonu v jednotkách či desítkách wattů.



Obr. 11 porovnání žárovky a laseru (převzato a upraveno z [7])

Každoročně je v ČR evidováno několik desítek laserových útoků na posádky leteckých dopravních prostředků. Většinou se tím baví lidé, které si neuvědomují, jaké problémy tím mohou způsobit (viz obr. 12). Tato problematika je podchycena v novele č. 407/2010 zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví, kde je i určen ochranný pásem v okolí letišť. Oslňovat pilota jakéhokoliv leteckého prostředku opravdu není legrace a hrozí za to sazby odnětí svobody až na několik let.



Obr. 12 ukázka bezpečných vzdáleností pro zelený laser (5mW, 532nm)

#### 4.1.1 Bezpečnostní prostředky pro ochranu zraku.

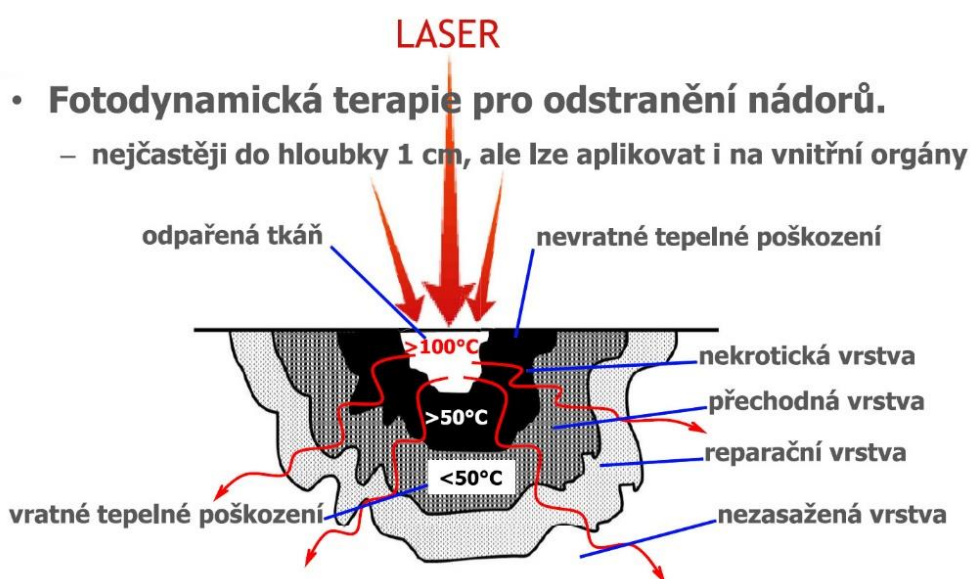
Brýle pro ochranu zraku před laserovými účinky musí splňovat normu ČSN EN 207/208 o osobních prostředcích o ochraně očí. [25] Při práci s lasery je vždy třeba používat ochranné brýle s bočním stíněním, aby bylo zabráněno poranění oka zpětným odrazem od rozptýlených nebo odražených paprsků. Na každou vlnovou jsou určeny konkrétní brýle, existují však i univerzální, které poskytují komplexní ochranu před všemi vyzařovanými spektry a však za cenu velmi malé průhlednosti brýlí. Kvalitní brýle na ochranu před laserovým zářením (obr. 13) na sobě vždy mají dvojí označení, první část udává, na jaké vlnové spektrum jsou určeny (v nanometrech) a druhá část úroveň ochrany před optickou hustotou vyzařovaného svazku (výkonem), značí se OD a nabývá hodnot od 1 do 10 (čím větší tím lepší). Mohou mít ještě třetí dodatečné značení, tzv. VLT (visible light transmission), které je v procentech a udává míru propustnosti viditelného světla. Volně přeloženo udávají to, jak dobře bude přes brýle vidět, čím vyšší číslo, tím lepší propustnost viditelného světla. [23] Například brýle s označením: 190-400 nm OD5 55% VLT ochrání zrak před zářením o vlnové délce 190 až 400 nm, poskytují ochranu, kterou vypočteme jako  $P_{OUT}$  (nesmí překročit 5mW) =  $10^{-OD} \cdot P_L$  (výkon laseru proti kterému se chceme chránit), propustnost viditelného světla je 55%. Tzn., tyto brýle poskytují spolehlivou ochranu až do výkonu 500mW. Další možností jak chránit zrak (ale i kožní tkáň) je bariérou mezi laserovým zdrojem a pozorovatelem. Tyto bariéry lze vyrobit ze speciálních tkanin, pevných desek nebo skla či polykarbonátů, které budou eliminovat škodlivé účinky laseru na zrak stejně jako by to udělaly ochranné brýle a však bez nutnosti jejich nošení. [26]



Obr. 13 příklad značení brýlí pro ochranu před laserovým zářením (převzato z [24])

## 4.2 Biologické účinky na kožní tkáň

Oproti oku je působení na kůži méně nebezpečné, ale jen za předpokladu, že jsou dodrženy všechny bezpečnostní opatření pro konkrétní třídu laseru, které jsou vyjmenovány v odstavcích 4.3 až 4.7. Při jejich porušení mohou být účinky laseru na kožní tkáň potažmo lidské tělo fatální a hlavně velice rychlé. Kůže sice na rozdíl od oka vnímá (jako teplo) ozáření UV a IR lasery, její reakce ale určitě nedosahuje rychlosti několika femto sekund jako dosahují některé výkonné lasery, tzn. reflexivní reakce pokožky, nedokáže zabránit jejímu poškození. Pro pokožku je kritická teplota cca 50°C, nad touto teplotou dochází k jejímu nevratnému poškození a odumření (obr. 14). [7] [15] [41]



Obr. 14 účinky laseru na pokožku (převzato z [7])

Laser ale nemusí nutně jenom škodit, v medicíně je dnes i hojně používán pro chirurgii nebo i pro terapii. Laserové světlo o vhodné vlnové délce totiž dokáže napomáhat lepší regeneraci tkáně, třeba po operaci nebo při zranění a tím zmenšením zjizvení tkáně. Lasery se dnes často využívají v estetické medicíně, například pro odstraňování pigmentových skvrn, nechtěného tetování, zmírnění nadměrného pocení, trvalou epilaci nebo třeba jen pro omlazení pleti v obličeji a dekoltu. Moderní chirurgie by se dnes bez laseru zřejmě neobešla a oční chirurgie by se bez něj neobešla dokonce vůbec. Pomocí laseru lze i neinvazivně odstraňovat nádory uvnitř pacientova těla. Stačí jen nádor „označit“ vhodnou látkou, která se bude koncentrovat pouze v něm a tu pak fotochemicky aktivovat. Nádor je tedy s její pomocí selektivně zničen laserem, aniž by došlo k invazivní operaci (obr. 15). [15] [29] [41]





Obr. 15 selektivní odstranění nádoru pomocí laseru (převzato z [7])

#### 4.2.1 Bezpečnostní prostředky pro ochranu kožní tkáně

Nebezpečí poškození kožní tkáně je přímo úměrné výkonu a době trvání laserového záření, může tak snadno dojít k popálení kůže, které se projeví pouze zarudnutím až po velké hloubkové zářezy, které mohou mít i smrtelné následky. Je tedy třeba rovněž používat ochranné rukavice, ochranný oblek a někdy i ochranné masky. Jejich vlastnosti musí být, stejně jako u brýlí, přizpůsobeny konkrétnímu typu laseru a měly by být uvedeny v návodu k obsluze laseru, nebo by je na vyžádání měl poskytnout jeho výrobce. V případě laserů v ultrafialovém spektru účinně poslouží svářečský oblek se sníženou hořlavostí a svářečské rukavice. Při práci s lasery se mohou využívat i další typy ochranných pomůcek, mezi ty osobní patří například obličejový štít. Jak již bylo zmíněno v části 4.1.1 v rámci prostoru, kde je laserové zařízení umístěno, se dále používají nejrůznější clony a kryty, automatické žaluzie a fólie nebo jiné filtry k odstínění oken. [15] [28]

#### 4.2.2 Technická opatření proti nechtěnému kontaktu s laserem

V kapitolách 4.1.1 a 4.2.2 bylo řečeno jak se chránit před laserovým zářením v případě, že vše funguje tak jak má. Jsou zde však další technická opatření, které je třeba dodržovat a vždy počítat i s možností poruchy či selhání přístroje. Z toho důvodu je třeba ještě dodržovat určitá technická opatření jako třeba:

- Zajistit dostatečné odvětrávání prostor, kde se laser používá.
- Jetody ochrany při selhání (např. automatické žaluzie, které chrání oči uživatele před odraženým laserovým paprskem).
- Všechny kryty obklopující energetickou a vyzařovací část laseru musí být chráněny koncovými spínači, které v případě neoprávněného otevření buď laser vypnou, nebo ho odpojí od elektrické energie.
- Spuštění laseru musí být chráněno proti neoprávněné aktivaci, zámkem nebo klíčem a musí být namontovány automatické mechanismy, které zabrání poranění pracovníků, kteří dělají na přístroji údržbu a obsluhu.
- V místnosti musí být odstraněny všechny reflexní plochy.
- Všechny okna musí být zakryta nebo vybavena fóliemi pro absorpci případného odraženého paprsku. [15]



### 4.3 Rozdělení laserů podle bezpečnostních tříd

Dělení laserů do tříd podle jejich nebezpečnosti je stanoveno normou ČSN EN 60825-1 ed. 3. Norma zavádí nové třídění a to: třídy 1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B, 4. Toto dělení bylo vyvinuto, aby bylo pro uživatele snazší určení rizik při používání laseru a zároveň snadné určení bezpečnostních opatření, které je třeba dodržet, aby nedošlo k poranění obsluhy. Třídy tedy vůbec nezohledňují nebezpečí úrazu třeba elektrickým proudem nebo potřísněním chemikáliemi, který mi jsou některé lasery chlazeny nebo je používají jako aktivní prostředí, zohledňují pouze nebezpečí hrozící pokožce nebo oku. To znamená, že třídy nejsou ani tak závislé na výkonu laserů, ale hlavně na tom, jak moc velké reálné nebezpečí hrozí při práci s nimi nebo jen pohybu kolem nich. Obecně, tedy nelze pouze na základě výkonu laseru zařadit práce s ním do určité kategorie. Je potřeba ještě počítat s tím, za jakých podmínek je laser instalován a provozován (viz uvedená norma). Pro správnou instalaci a užívání laserů platí přísné požadavky, které pokud budou splněny, zajišťují bezpečnost osob pracujících s nimi. Možná rizika lze efektivně omezit použitím ochranných osobních prostředků nebo třeba použitím ochranných krytů, které budou zajištěny a hlídány proti neoprávněnému otevření. [7] [11] [15] Dále norma ČSN EN 60825-1 ed. 3 stanovuje podobu výstražných štítků a jejich umístění. Tato norma ale nestanovuje přesnou podobu takových štítků, pouze udává, co všechno musí obsahovat. Každý laser, bez ohledu na výkon, musí být ze zákona označen štítkem, že se jedná o laserové zařízení (obr.16). Zároveň každý štítek vyjma třídy 1 musí být vyveden v kombinaci černých nápisů nebo symbolů a žlutého pozadí, u třídy 1 tato kombinace barev nemusí být dodržena. Zároveň musí být takový štítek trvale upevněn (nalepen, natisknut nebo vyryt) na zařízení na zřetelném místě, toto neplatí pro lasery, které ani při servisních či poruchových stavech nepřekročí třídu 1.

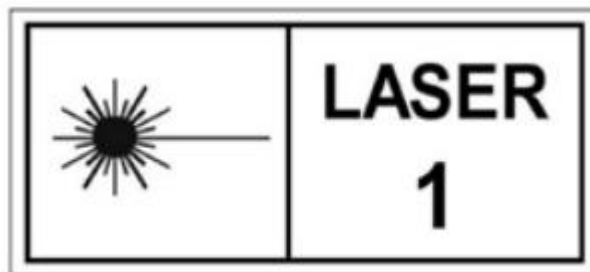
Dále bude podrobněji popsáno zařazení laserů podle tříd a jaká specifika sebou tyto třídy nesou.



Obr. 16 možná podoba obecného označení laserového zařízení (převzato z [6])

#### 4.4 Třída 1

Jedná se o lasery, které jsou bezpečné za předvídatelných podmínek, pokud laser funguje správně a není poškozen, tak tyto lasery nejsou nebezpečné a nevyžadují žádné bezpečnostní opatření. Jsou to tedy všechny lasery kde je kompletně zakrytá dráha svazku (kryty musí být zabezpečeny proti neoprávněnému otevření během činnosti), nebo lasery s tak malým výkonem, že ani přímý pohled do svazku není pro oko nebezpečný a to dokonce ani při použití optických pomůcek jako je lupa, mikroskop a jiné. Pozor, to ale neznamená, že když budete mít laser o vlnové délce větší než 1400 nm, která neprojde oční rohovkou, tak se jedná vlastně o bezpečný laser. Pokud tento laser totiž bude mít dostatečný výkon, tak způsobí poškození rohovky, jak bylo popsáno v kapitole 4.1. Třída 1 tedy znamená potenciálně nejnižší riziko poranění při práci s tímto zařízením nebo i pohybu v místnosti, kde je umístěno. Často se jedná i o zařízení s kterými jsme denně v kontaktu, aniž bychom to věděli, třeba DVD-ROM, laserová tiskárna nebo jsou to pak naopak vysoce výkonné lasery, které jsou ale kompletně zakrytované a nehrozí tedy oční ani jiný kontakt se světelným svazkem. To paradoxně znamená, že tato třída může zahrnovat lasery s výkonem pouhých několik desetin miliwattů nebo naopak lasery o výkonu v řádech megawattů a více.[6] [7]



Obr. 17 označení laseru třídy 1 (převzato z [6])

#### 4.4.1 Třída 1M

Platí stejné podmínky jako pro třídu 1, s tím rozdílem, že třída 1M může být nebezpečná při použití optických přístrojů, jako je třeba lupa nebo mikroskop. Tyto lasery se často používají v optických komunikačních systémech. [6] [7]



Obr. 18 možné označení laseru třídy 1M (převzato z [6])

#### 4.4.2 Třída 1C

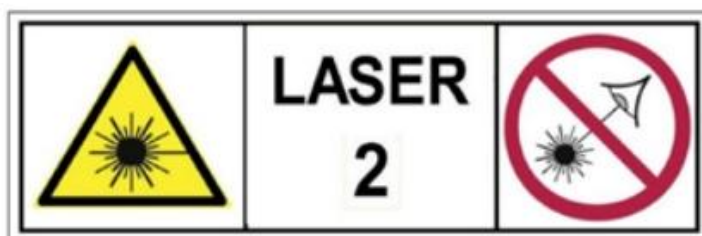
Jedná se hlavně o lasery, které jsou přímo určeny k ozařování pokožky ve zdravotnických a kosmetických zařízeních. Tyto lasery se používají třeba k epilaci chlupů, redukci vrásek a jiných lékařských procedur. Tato třída vznikla poměrně nedávno a to z jednoduchého důvodu. Tyto zařízení by jinak spadaly do kategorií 3 nebo 4 a to by lidem, kteří s nimi pracují, přineslo spoustu problémů. Lasery třídy 1C, oproti ostatním laserům v třídě 1 a 1M jsou vybaveny takovými technickými prostředky, aby nemohlo dojít k ozáření oka nebo popálení pokožky. Volně řečeno tato zařízení mají detekci přiložení ke kůži (či jinému materiálu) a pokud dojde k jejich oddálení od podložky, laserový svazek se automaticky deaktivuje, aby nemohlo dojít k nechtěnému ozáření oka. [6] [7]



Obr. 19 možné označení laseru třídy 1C (převzato z [6])

## 4.5 Třída 2

Jedná se lasery v pulsním i kontinuálním režimu s nízkým výkonem (do 1 mW) ve viditelném spektru (400-700 nm) o maximální délce pulsu 0,25 s. Hodnota výkonu se pohybuje do  $300 \text{ Wm}^{-2}$ , což je zhruba třicetkrát více než hodnota výkonu poledního slunce. Jejich bezpečnost je zajištěna hlavně fyziologickými reakcemi oka, tzn. mrkáním nebo úlekovou reakcí, díky které by nemělo dojít k poškození žádné části oka. Při jejich používání, bychom se měli vyvarovat přímému pohledu do svazku. Použitím optických pomůcek (lupa, dalekohled) nezvýšíme nebezpečí poranění oka. Přesto tento laser může způsobit oslnění, zábleskovou slepotu nebo déletrvající zrakové vjemy. Používají se třeba ve čtečkách čárových kódů, při laserových hrách v zábavních parcích nebo v laserových ukazovátkách. [6] [7]



Obr. 20 možné označení laseru třídy 2 (převzato z [6])

### 4.5.1 Třída 2M

Pro tyto lasery platí opět stejné podmínky jako pro třídu 2, s tím rozdílem, že mohou být nebezpečné při použití optických přístrojů, jako je lupa, mikroskop a další. Je doporučeno při jejich používání mít nasazeny osobní ochranné prostředky pro ochranu zraku. Stejně jako u třídy 2, u nich i bez použití optických pomůcek může dojít k oslnění, zábleskové slepotě nebo déle trvající zrakové vjemy. Tyto lasery se používají třeba v měřicí technice pro geodety, při laserových show na koncertech nebo ve stavebních laserech, které používají zedníci pro udržení roviny či svislice. [6] [7]



Obr. 21 možné označení laseru třídy 2M (převzato z [6])

## 4.6 Třída 3R

Jedná se o lasery, u kterých by přímé sledování do svazku mohlo být nebezpečné, limity jsou pětinasobné oproti třídě 2, tzn. do 5 mW u viditelného světla, v jiných spektrálních oblastech se maximální přípustná emise (AEL) musí spočítat. Při používání laserů třídy 3R bychom se vždy měli vyvarovat přímému pohledu do světelného svazku a je doporučeno používat osobní ochranné prostředky pro zrak. Tato třída laserů by se zároveň měla vždy používat jen tam, kde je přímý pohled do svazku jen velice málo pravděpodobný. Takovýto laser samozřejmě dokáže způsobit zábleskovou slepotu, oslnění nebo i přetrvávající zrakové vjemy. Riziko poranění zraku se zvyšuje s délkou ozáření svazkem a zároveň stoupá s mírou kontrastu vůči osvětlenosti okolí. Volně řečeno v noci je riziko poranění očí větší než za slunného dne. Tyto lasery se mohou vyskytovat též u stavebních laserů, laserových skenerů a dokonce i některá laserová ukazovátka, ač by neměla, spadají do této kategorie. [6] [7]



Obr. 22 možné označení laseru třídy 3R (převzato z [6])

### 4.6.1 Třída 3B

Zde už se jedná o lasery všech vlnových délek o středním výkonu (do 500 mW), u kterých je nebezpečný přímý i zrcadlový pohled do světelného svazku. Naopak difuzní odraz je považován za bezpečný. Tyto lasery jsou už natolik silné, že při zaostření mohou vyvolat popálení pokožky nebo dokonce zapálit snáze hořlavé materiály. Je tedy potřeba při manipulaci s nimi dbát zvýšené opatrnosti. Používají se často ve spektrometrii, stereolitografii (druh 3D tisku) nebo i při laserových show. [6] [7]



Obr. 23 možné označení laseru třídy 3B (převzato z [6])

## 4.7 Třída 4

Jedná se o lasery všech vlnových délek a výkonů nad 500 mW, s nezakrytou dráhou svazku. Tyto lasery jsou nebezpečné nejen pro oko, ale i pro kůži, je u nich nebezpečný jak přímý pohled do světelného svazku, tak zrcadlový odraz, ale dokonce i difuzní odraz od matných předmětů. Při jejich používání je povinné používat osobní ochranné prostředky pro zrak. Tyto lasery se nejčastěji používají ve strojírenství (obrábění, sváření, kalení, atd..) nebo v chirurgii. Zároveň představují i velké riziko vzniku požáru. Jak jsem již zmínil v kapitole 4.3, takovýto laser si ale můžete celkem snadno pořídit zcela legálně i domů ve formě laserové gravírovačky, která bez nejmenších potíží vypaluje nápisy do kovu a nemá problém řezat balzové dřevo nebo kartonový papír. [6] [7]



Obr. 24 možné označení laseru třídy 4 (převzato z [6])

## 4.8 Legislativa

### Výčet minimálních opatření k ochraně zdraví zaměstnance při práci s neionizujícím zářením

*„1) Pokud hrozí ozáření zaměstnance neionizujícím zářením překračujícím přípustné hodnoty, je třeba dodržet k ochraně jeho zdraví minimálně jedno z těchto opatření:*

- a) zajistit organizaci práce, pracovní postup a uspořádání pracoviště tak, aby bylo dosaženo snížení expozice zaměstnance elektromagnetickému poli pod nejvyšší přípustné hodnoty,*
- b) zajistit osobní ochranné pracovní prostředky, pokud jsou pro daný druh neionizujícího záření dostupné, které sníží expozici elektromagnetickému poli pod nejvyšší přípustné hodnoty.*

*2) Lasery třídy 3B a 4 se vybavují signalizací chodu, a to světelnou nebo akustickou. Světelná signalizace se upraví tak, aby byla v činnosti již při zapojení napájecích zdrojů. Barva signálního světla musí být taková, aby světlo bylo viditelné i přes ochranné brýle. [16]*

*3) Lasery zařazené do třídy 3B a 4 se zabezpečí proti uvedení do chodu nepovolanou fyzickou osobou. Prostory určené pro jejich provozování se označí bezpečnostními značkami pro laserové záření a zákazem vstupu nepovolaných fyzických osob. Z dráhy paprsku se odstraní všechny předměty, na nichž by mohlo dojít k nekontrolovanému zrcadlovému odrazu a paprsek se ukončí matným terčem s malým činitelem odrazu. Není-li možné zajistit chod paprsku tak, aby nezasáhl sklo v oknech, zakryjí se okna materiálem nepropouštějícím záření použité vlnové délky. U pulsních laserů je třeba zajistit, aby po odpojení zdroje elektrické energie došlo k vybití naakumulované energie do určené zátěže.“ [16]*

## **Obsah Technické dokumentace o údajích nezbytných pro ochranu zdraví při zacházení s lasery.**

*„Ke každému laseru musí být připojena technická dokumentace, v níž jsou obsaženy tyto údaje:*

- 1) vlnová délka laserového záření a druh laserového aktivního prostředí; jde-li o lasery vyzařující záření o větším počtu vlnových délek, udávají se všechny vyzařované vlnové délky*
- 2) režim generování laserového záření; udává se, zda jde o spojitý, pulsní nebo pulsní s vysokou opakovací frekvencí*
- 3) průměr svazku záření na výstupu laseru a jeho rozbihavost; u sbíhavého svazku také jeho nejmenší průměr*
- 4) u laserů generujících záření
  - a) ve spojitém režimu největší zářivý tok*
  - b) v pulsním režimu zářivá energie v jednom pulsu, nejdelší a nejkratší trvání jednoho pulsu, největší a nejmenší opakovací frekvence pulsů, nebo*
  - c) v pulsním režimu s vysokou opakovací frekvencí údaje jako v bodu 2 a dále největší střední zářivý tok vystupujícího záření**
- 5) zařazení laseru do třídy podle příslušné české technické normy*
- 6) návod k obsluze, návod k údržbě, a je-li to zapotřebí, důležitá upozornění, jako je zákaz snímání krytu u laserů opatřených krytem nebo upozornění na nebezpečí vyplývající z pozorování paprsku optickými pomůckami*
- 7) rok výroby a výrobní číslo, název a adresa výrobce, jedná-li se o právnickou osobu, pokud se jedná o osobu fyzickou, tak její jméno, příjmení, případně název obchodní firmy a adresa místa podnikání*
- 8) údaje o jiných faktorech než záření, vznikajících při chodu laseru, které by mohly nepříznivě ovlivnit pracovní podmínky nebo zdraví*
- 9) u laserů třídy 4, musí být vždy návod ke správné instalaci, včetně stavebních a prostorových požadavků.“ [16]*



## 5 Aplikace laserů

Laserové technologie mají dnes velmi široké uplatnění od běžných věcí, denní potřeby přes řezání kovů, laserové operace očí až po opravdu vědecké aplikace, jako je vrtání hornin ve vesmíru nebo urychlování částic pro termonukleární výzkum plazmatu.

### 5.1 V elektronice

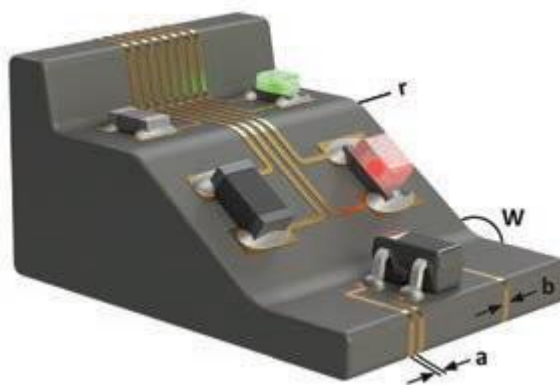
Lasery lze najít všude kolem nás a nejde při tom jen o CD, DVD a Blu-ray mechaniky, které se už dnes pomalu dostávají do pozadí. Dnes se s lasery setkáváme v obchodech při skenování čárových kódů v tiskárnách, ale i v zabezpečovacích a požárních systémech. Největší využití má ale asi v telekomunikaci a v oblasti výroby součástek a mikroprocesorů. Všechny moderní mikročipy jsou vyrobeny pomocí laseru.

V roce 1970 bylo poprvé zjištěno, že laser se dokáže velmi dobře šířit skrze optická vlákna, později bylo dokonce zjištěno, že tato vlákna mohou za určitých okolností fungovat také jako bezšumové optické zesilovače. Od prvního zjištění do dnešní doby uplynula dlouhá doba a laserové přenosy informací jsou dnes neodmyslitelnou součástí světa kolem nás. Internet by bez optických podmorských kabelů už nedokázal existovat, v roce 2014 byla celková délka podmorských kabelů odhadována na 885 000 km a podle statistik je těmito kabely přenášeno 99% všech dat. Tyto podmorské kabely dnes umožňují přenosovou rychlost v řádech desítek až stovek tera-bitů. [45]

Vláknové lasery se používají v polovodičovém průmyslu (při výrobě procesorů) pro jejich schopnost velmi přesného řezání křemíkového fotorezistu (světlo citlivý materiál), čímž je eliminován na minimum vznik odpadu a s tím související úspora nákladů. Další jejich velkou výhodou je rychlost s jakou dokáží lasery přepínat mezi více aplikacemi, čímž se velmi zkracuje čas potřebný výrobu součástek. [55]

Pomocí laseru lze i vytvářet plošné spoje na površích speciálních plastů pomocí metody LDS (Laser Direct Structuring), kdy jsou pomocí laseru na povrchu plastu vytvářeny budoucí dráhy plošných spojů, které jsou později chemicky pokoveny v měděné lázni. Tato metoda má výhodu ve veliké variabilitě tvarů (obr. 25), snazší miniaturizaci, rychlejším osazování součástkami a v neposlední řadě snadná výroba různých prototypů. Tato metoda má ale i nevýhody v podobě drahých anorganických přísad do plastového tělesa, složité možnosti

křížení tras a výsledný pokovený povrch je poměrně drsný. Tuto metodu často používají výrobci mobilních telefonů, aby dosáhli co největší úspory místa. [54]



Obr. 25 plastová matrice z termoplastu s vodivými drahami osazena součástkami (převzato z [54])

S plošnými spoji souvisí laserové selektivní pájení. Jedná se o technologii významně pomáhající při výrobě velkých objemů elektroniky, kde jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu, rychlost a možnost pájet na špatně přístupných místech. Tuto metodu si v posledních několika letech velmi oblíbil automobilový průmysl, kde jsou často kladeny velmi vysoké nároky na elektrické obvody. Velkou výhodou této technologie je snadné začlenění pájecích laserů do výrobní linky, vysoká přesnost, jejich schopnost pájet z horní i spodní strany, bezpečnost pro obsluhu, nízká spotřeba elektrické energie a možnost pájet na velice tenké substráty, kde by při použití jiných metod došlo k jeho deformaci. [56] [57]

Jednou z největších technologických výzev na poli mikroprocesorů je počítač na bázi nikoliv polovodičů, ale na bázi světla (kvantový počítač). (obr. 26) V oblasti polovodičů se totiž technologie pomalu dostávají na hranici možné miniaturizace a další zmenšování procesorů již tedy brzy nebude možné, protože technologie a miniaturizace budou zastaveny fyzikálním omezením na hranici velikosti atomů. Kvantové počítače by tento problém vyřešily a umožnily by opět další výrazné zrychlování procesorů. [43] Přestože společnost IBM v současné době tvrdí, že kvantové počítače nejspíše v budoucnu nikdy nenahradí ty klasické, založené na tranzistorech, tak v roce 2019 přišla na veletrhu CES s prvním kvantovým počítačem, který je určen pro vědecké a obchodní využití. [44]



Obr. 26 kvantový počítač od společnosti IBM (převzato z [46])

## 5.2 V průmyslu

Průmysl a strojírenství obecně velmi rychle dokázaly využít všech předností, které laser nabízí. Je to především obrábění kovů, vrtání, svařování, kalení, žíhání, čištění a v neposlední řadě i značení výrobků. Obrábění (vrtání) lasem je poměrně čistá záležitost, nedochází k výrobě kovových pilin, špon ani jiného odpadu, navíc je velká výhoda v obrovské přesnosti a snadné údržbě. Při laserovém obrábění není třeba používat přímo na materiál chladicí emulzi, nedochází tedy ke znečišťování stroje a jeho okolí a nutnosti ekologické likvidace těchto látek. Laser se navíc oproti vrtákům a jiným frézám neopotřebovává, nedochází tedy postupně ke změně jeho obráběcích vlastností. Jedinou nevýhodou (kromě ceny) je asi nutnost odsávání vzniklých par, které u klasického obrábění či vrtání nevznikají v takové míře, materiál je totiž laserem tak rychle ohřát, že dochází k jeho odpaření (sublimaci). Používá se též pro velice přesné a rychlé svařování. [12] [32]

Další možností použití laserů v průmyslu je 3D tisk a nebo 3D skenování. 3D tiskárny kovů dokáží vytvořit tvary, které by jinými technologiemi bylo téměř (či zcela) nemožné vytvořit nebo jen za cenu velké materiálové ztráty (obrábění) či drahé ruční práce. To samé platí v oblasti 3D tisku z plastových filamentů.

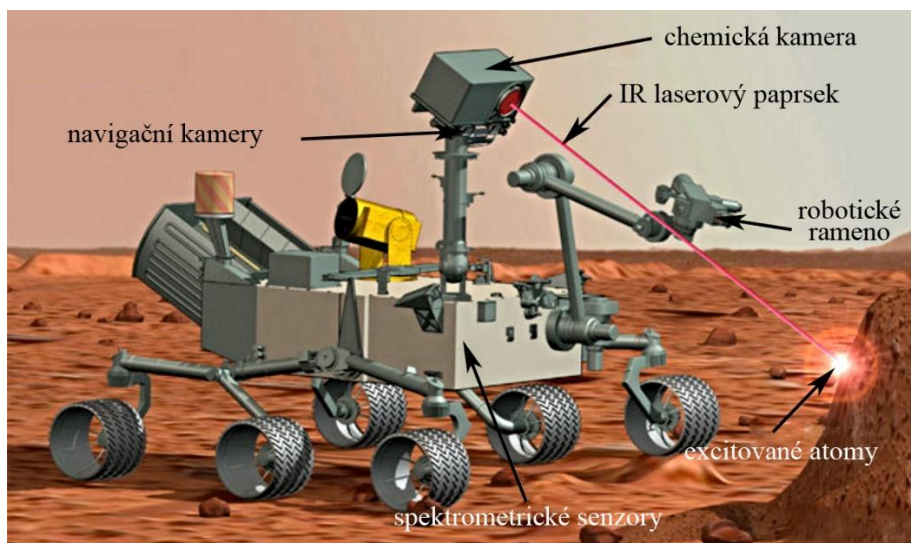
Konstrukce a zpracování moderních automobilů by bez nich nemohla dosahovat kvalit, ceny a rychlosti, jakých dnes dosahuje. Všechny dnešní velké automobilky lasery používají pro výrobu a svařování karosérií, ale i pro řezání materiálů v interiéru a dokonce i při výrobě některých motorů.

Veliké uplatnění má laser v průmyslu a v běžném životě obecně, jako bezkontaktní nástroj pro měření vzdáleností nebo teploty.

### 5.3 Ve vědě

Hned po průmyslu je největší uplatnění laserů v oblasti vědy. Lasery s výkonem v řádech mega wattů a výše se často používají pro zkoumání plazmatu, čili termonukleárních reakcí, podobných těm, které se dějí ve hvězdách. [30]

Vozítko Curiosity na Marsu použilo jako první v roce 2012 laser na povrchu jiné planety a to ke zkoumání chemického složení látek, na základě ionizace materiálu laserem a následné analýze pomocí chemické kamery (chemcam) (obr. 27) [31]



Obr. 27 vozítko Curiosity na Marsu (převzato z [52])

Velkou novinkou na poli laserů jsou lasery zářící v rentgenovém spektru. Tyto lasery jsou nejčastěji používány pro vědecké účely v urychlovačích částic a jejich výkony jsou v řádech gigawattů. V roce 2017 byl v Evropě, ve výzkumném centru DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) v Německu spuštěn nejmodernější a největší z nich, jeho jméno je FLASH a jedná se o vysokofrekvenční pulsní laser (více než 27 000 pulzů za sekundu). V podstatě je to nejvýkonnější vysokorychlostní kamera na světě v rentgenovém oboru, lze se díky ní tedy dívat skrze materiály. Zajímavostí také je, že délka tohoto laseru je 3,4 km z toho jenom urychlovací část má přes 2 km a obsahuje 17 290 permanentních magnetů. [27]

V současné době nejvýkonnější pulsní laser na světě se jmenuje ATON (název nese podle egyptského boha slunce) (obr. 28), který dosahuje ve svém koncentrovaném svazku během desetiny pikosekundy špičkového okamžitého výkonu deseti PW (petawattů;  $10^{15}$  W) s opakovací frekvencí jeden puls za minutu. Jedná se tedy o velmi výkonný laser s extrémně krátkými pulsy. Pro pochopení o jak obrovský špičkový výkon se jedná, je vhodné srovnání s golfským proudem, ten totiž jako celek přenáší stabilně průměrný tepelný výkon ve výši 1,4 PW. Průměrný dlouhodobý energetický výkon lidské civilizace je přitom asi stokrát menší (16-18 TW). Jedná se samozřejmě o pevnolátkový laser, překvapivě není polovodičový ani vláknový, ale je to krystalový laser o vlnové délce 820-1050 nm, vyzařuje tedy v IR pásmu. Laser ale využívá laserových diod k jeho buzení. ATON se používá hlavně jako zdroj sekundárního záření pro urychlování částic nebo emitování rentgenového záření. [33]



Obr. 28 nejvýkonnější pulsní laser na světě L4 ATON (převzato z [53])

## 5.4 Ve zdravotnictví a medicíně

Hned po průmyslu a vědě je laser asi nejčastěji používán ve zdravotnictví. Dnešní oční chirurgie je na laserech doslova založená a většina dnes běžných operací očí by bez něj byla neproveditelná. Obrovskou výhodou laseru je možnost tzv. neinvazivních operací, (viz kapitola 4.2), kdy je v těle pacienta pomocí laseru fotochemicky aktivována určitá látka, která byla před tím vpravena například do nádoru a ten je tak selektivně zničen. (obr. 15) Laser se velmi často používá jako náhrada klasického skalpelu a lze ho dokonce ovládat i vzdáleně, tzn. chirurg a pacient nemusí být spolu v jedné místnosti ba dokonce ani na stejném kontinentu. [42] Laser tedy využívají onkologická oddělení k odstraňování nádorů a rakovinových buněk, urologické oddělení k litotrypsi (odstraňování močových a žlučnickových kamenů), kardiochirurgie a neurochirurgii k obnovení funkce svalů a nervových zakončení. [42] Dále kde se lasery hojně využívají je estetická a rekonstrukční chirurgie. Určité vlnové délky velmi dobře působí na regeneraci tkáně a urychlují tak hojení a snižují nebo zcela eliminují tvorbu jizev. Dále se lasery hojně používají pro odstraňování různých pigmentových skvrn, tetování nebo při lipolýze, což je odstraňování nežádoucího tuku. Lasery se ale také používají ke studiu vnitřní struktury buněk mikroorganismů a výrobě chemických látek. [6] [42]



## 5.5 Ostatní aplikace

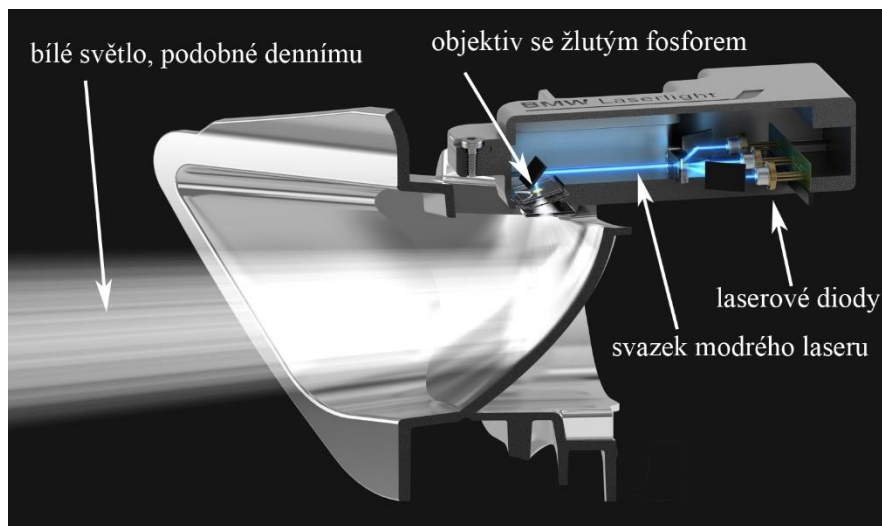
Další odvětví, kde se lasery používají stále ve větší míře, je zbrojní průmysl. Vzhledem k energetické náročnosti laserů se v nejbližší době asi nesetkáme s tím, že budou vojáci používat ruční laserové zbraně. Ale již dnes armáda lasery experimentálně používá na lodích a podvozcích nákladních vozidel. Největším úskalím je samozřejmě příkon laserů, který dnešní technologie nedokáže pokrýt v něčem tak malém jako je ruční zbraň. V současné době asi největší mobilní laser ATHENA (Advanced Test High Energy Asset) od Lockheed Martin dosahuje výkonu 60kW a je montovaný jako nástavba na podvozku osmikolového nákladního vozidla. (obr. 29) Jedná se o vláknový laser, který je schopen sestřelit malé letadlo (dron) na vzdálenost větší než jeden a půl kilometru. Výkon tohoto laseru zatím neumožňuje ničení větších a obrněných cílů jako jsou tanky, ale snadno zranitelné cíle jako jsou letadla, vrtulníky nebo rakety dokáže natolik poškodit, že buď dojde k jejich destrukci, nebo alespoň k takovému poškození, že jsou nuceny přistát a nemohou splnit svůj účel. [34] Je veřejným tajemstvím, že na vývoji laserových zbraní s USA spolupracuje i Izrael, který by rád tyto systémy použil jako levné řešení na obranu před raketami, které přilétají z Pásmu Gazy.



Obr. 29 mobilní laser ATHENA (převzato z [47])



Stále častěji se lasery začínají používat i jako zdroj světla v automobilech, kdy je modrý laser pomocí žlutého fosforu převáděn na bílé světlo (obr. 30). Jejich výhodou je až dvounásobný dosvit oproti LED světlometům. [48]



Obr. 30 laserový světlomet BMW (převzato a upraveno z [50])

Na trhu je několik společností, které od roku 2015 vyrábí laserové projektory i pro běžné uživatele. Tyto projektory dosahují zatím nepřekonatelného poměru dynamického kontrastu oproti jiným technologiím a to až 2 500 000:1. Pro představu kontrast dosahovaný nejlepšími LED projektory není ani poloviční. Laserový zářič má navíc velikou živostnost a to až 25 000 hodin provozu, což je minimálně dvakrát více než nejlepší LED projektory a zhruba desetkrát více než lampové projektory. [37]

Novinkou v oblasti laserů je vychylování jejich svazku pomocí elektromagnetického pole. Laser je elektromagnetické záření a lze jej tedy vychylovat podobně, jako se dříve vychyloval paprsek u klasických CRT televizorů. Při použití elektromagnetického vychylování není tedy třeba používat skenovací hlavu s dvěma zrcátky a lze tak dosahovat při řízení svazku daleko větších rychlostí a přesnosti. Avšak toto použití je zatím jen teoretické nebo v rámci laboratorních experimentů. Reálnému použití brání nutné použití obrovské intenzity elektromagnetického pole. [6] [3]

Zajímavostí je možné použití laseru jako pohonu vesmírných těles, tzv. solárních plachetnic. Takové vesmírné těleso by muselo disponovat velkými odrazivými plochami (plachtami), které by se rozvinuly a na ně by působil proud fotonů vystřelovaných ze Země. Fotony mají totiž stejně jako jiné částice mechanické účinky, ale velmi malé. Tento pohon je proto zatím spíše jen v teorii, jeho praktickému použití brání hlavně velmi malý výkon takového pohonu, takže by taková vesmírná sonda musela mít velmi malou hmotnost (v řádech jednotek gramů) a druhým úskalím je potřebný obrovský výkon pozemních laserů (je počítáno s desítkami až stovkami laserů) pro pohon takového tělesa. Ty by musely dosahovat celkového výkonu v řádech stovek gigawatt. Díky velmi malé hmotnosti takové sondy lze teoreticky dosáhnout až 20% rychlosti světla, pokud šlo udržet výkon laserů po dobu deseti minut. [49]

Pomocí laseru lze také vytvořit hologramy a to ne jen obyčejnou samolepku simulující trojrozměrný obraz, jakou známe jako ochranný prvek různých cenných papírů, ale lze jím vytvořit i skutečný hologram v prostoru, avšak zatím jen velmi malý (maximálně jednotky centimetrů). [40]

## Závěr

Laser je v principu dnes již velmi staré zařízení (více než 50 let od jeho objevení), které transformuje elektrickou energii na elektromagnetické záření. Toho dosahuje díky svému aktivnímu prostředí, které je buzeno vnějším zdrojem energie a to celé je uzavřeno v rezonátoru, který zesiluje jeho výkon. Specifikem laseru je, že vyzařuje záření, které je monochromatické a koherentní, zároveň je schopen soustředit velký výkon do velmi malého spektra, případě pulsních laserů i do velmi krátkého časového úseku (pulsu).

Bezpečnostní třídy, do kterých se lasery dělí, vlastně nemají žádnou vypovídající hodnotu o tom, o jak výkonný laser se jedná, ale udávají pouze to, jak moc může uškodit našemu zdraví, za běžných podmínek. Tyto třídy neříkají nic o bezpečnosti laseru při servisních nebo poruchových stavech, při kterých může jít dokonce o zdraví či život osob v jeho blízkosti. Zároveň pokud se laser používá s rozumem a dodržují daná bezpečnostní opatření pro určité třídy laserů, jedná se pak o poměrně bezpečné zařízení, kdy by při jeho používání nemělo docházet k poranění obsluhy.

Jedno z odvětví, kde dnes laser nachází největší uplatnění je elektronika. Dnešní telekomunikační sítě, které využívají optických přenosů (vzduchem či optickými vlákny) už bez něj nedokáží fungovat nebo jen za cenu extrémně malých přenosových kapacit. Výroba mikroprocesorů a malých pájených obvodů je na něm taktéž existenčně závislá. Další odvětví, které lasery ve velké míře využívá je strojírenství, tam laser umožňuje to, co by klasické obráběcí stroje buď nedokázaly nebo jen za cenu vysokých nákladů. Je téměř jedno, zda je myšleno svařování, obrábění, kalení, pájení nebo dokonce 3D tisk, který dokáže vytvořit takřka jakékoliv tvary. Ve všech těchto oblastech laser vždy překoná jiné obráběcí či svařovací stroje.

Dalším odvětvím, které začíná být na laserech existenčně závislé je zdravotnictví a medicína. Operace očí se dnes už skoro ani jinak než laserem neprovádějí. Laser dovoluje neinvazivní operace nádorů uvnitř lidského těla, které by dřív vůbec nebyly možné. Biomedicína díky laserům dokáže zkoumat buňky do nejmenších detailů. A v poslední době velmi oblíbená estetická medicína se při odstraňování vrásek nebo jizev bez laseru také neobejde.

Přínos laseru pro dnešní svět je opravdu obrovský, takřka ve všech odvětvích a moderní svět už by bez laserů nedokázal fungovat. Díky laserům lze dosahovat dříve netušených možností, přesnosti, rychlosti a efektivity.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Enginnerguy. *How laser works* [online] 5. 6. 2012 [cit. 2021-03-11] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=oUEBMjtWc-A>
- [2] Czechlasers. *Historie laserů ve světě* [online] 2018 [cit. 2021-03-12] Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/historie-laseru-ve-svete/>
- [3] ted-maiman-real.jpg. *Physicsworld* [online] 2010 [cit. 2021-03-12] Dostupné z: <https://physicsworld.com/wp-content/uploads/2010/05/ted-maiman-real.jpg>
- [4] Leonardo technology. *Aktivní prostředí pro Jima Gordona* [online] [cit. 2021-03-12] Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
- [5] Institute of scientific instruments. *Interferometrie měření světlem* [online] [cit. 2021-04-05] Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2004999/>
- [6] LT10.pdf. *Leonardo technology* [online] [cit. 2021-04-18] Dostupné z: <http://www.lt.cz/Casopis/LT10.pdf>
- [7] Bezpečnostní přednáška od PROFiber Networking CZ s.r.o. pdf. – viz příloha
- [8] Spectrump.gif. *Elektrorevue* [online] 2002 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/spectrump.gif>
- [9] SKOŘEPA Martin. *Elektrické vozy* [online] 23. 11. 2020 [cit. 2021-05-03] dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/cinska-tesla-prinese-jako-prvni-na-svete-do-serioveho-vozu-technologie-lidar>
- [10] Leonardo technology. *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů* [online] 2020 [cit. 2021-05-03] Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnotatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [11] Kopina. *Vláknový laser* [online] 30. 3. 2020 [cit. 2021-05-04] Dostupné z: <https://kopina.cz/terminologie/39286/vlaknovy-laser/>
- [12] Nd: YAG laser. *Wikipedie otevřená encyklopedie* [online] 4. 3. 2015 [cit. 2021-05-08] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG\\_laser](https://cs.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG_laser)
- [13] Diode\_laser.jpg. *Wikipedie otevřená encyklopedie* [online] [cit. 2021-05-08] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserov%C3%A1\\_dioda#/media/Soubor:Diode\\_laser.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserov%C3%A1_dioda#/media/Soubor:Diode_laser.jpg)
- [14] Leonardo technology. *Princip vláknového laseru* [online] 2020 [cit. 2021-05-09] In: Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [15] Bozpprofi. *Bezpečnost při používání laseru se zaměřením na zdravotnictví* [online] 26. 2. 2012 [cit. 2021-05-10] Dostupné z: [https://www.bozpprofi.cz/33/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-na-zdravotnictvi-uniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox\\_ZyDs6-r29kev86iZirc5-dg/](https://www.bozpprofi.cz/33/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-na-zdravotnictvi-uniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_ZyDs6-r29kev86iZirc5-dg/)
- [16] Bozpprofi. *Nariadení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením* [online] 5. 10. 2015 [cit. 2021-05-11] Dostupné z: [https://www.bozpprofi.cz/33/291-2015-sb-narizeni-vlady-o-ochrane-zdravi-pred-neionizujicim-zarenim-uniqueidOhwOuzC33qe\\_hFd\\_-jrpTqa9jRzTbvq3D4Ye8SKFsY0CD-vMUnwPlw/](https://www.bozpprofi.cz/33/291-2015-sb-narizeni-vlady-o-ochrane-zdravi-pred-neionizujicim-zarenim-uniqueidOhwOuzC33qe_hFd_-jrpTqa9jRzTbvq3D4Ye8SKFsY0CD-vMUnwPlw/)
- [17] PapadakisRacing. *Turbo manifold 3D printed from inconel powder* [online] 4. 12. 2020 [cit. 2021-05-13] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4jbn0ah3u9E>
- [18] Slide ToDoc. *Čištění laserem* [online] [cit. 2021-05-13] Dostupné z: <https://slidetodoc.com/itn-laserem-itn-laserovm-paprskem-nd-yag-excimer/>

- [19] DANYL Pavel. *Zdravi.euro* [online] 22. 6. 2016 [cit. 2021-05-13] Dostupné z: <https://zdravi.euro.cz/clanek/ochrana-zdravi-pri-praci-s-lasery-v-pracovnim-prostredi-zdravotnickych-zarizeni-482415>
- [20] Leonardo technology. *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů* [online] 2020 [cit. 2021-05-19] Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [21] Nd-YAG-krystal.jpg. *Kopina* [online]. 2020 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://kopina.cz/wp-content/uploads/2020/03/Nd-YAG-krystal.jpg>
- [22] Dye laser. *Wikipedie otevřená encyklopedie* [online] 31. 12. 2020 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dye\\_laser#Chemicals\\_used](https://en.wikipedia.org/wiki/Dye_laser#Chemicals_used)
- [23] philips-safety. *Laser safety glasses* [online] [cit. 2021-05-20] Dostupné z: <https://www.phillips-safety.com/product-category/laser-safety/laser-safety-glasses/?od=5&wavelength-min=500&wavelength-max=800>
- [24] LG-228\_aL\_\_25071.1512096163.jpg. *certified laser eyewear* [online] 2021 [cit. 2021-05-21] Dostupné z: [https://cdn11.bigcommerce.com/s-c7d26/images/stencil/1280x1280/products/179/661/LG-228\\_aL\\_\\_25071.1512096163.jpg?c=2](https://cdn11.bigcommerce.com/s-c7d26/images/stencil/1280x1280/products/179/661/LG-228_aL__25071.1512096163.jpg?c=2)
- [25] Technickenormy. *ČSN EN 207* [online] 1. 10. 2017 [cit. 2021-05-21] Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/csn-en-207-osobni-prostredky-k-ochrane-oci-filtry-a-prostredky-k-ochrane-oci-proti-laserovemu-zarizeni-ochranne-bryle-proti-laseru-1/>
- [26] OK Technical Group. *laservision* [online] [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://ok-tg.com/ochrana-pred-laserem/mobilni-zasteny/>
- [27] DESY FLASH [online] 4. 6. 2020 [cit. 2021-05-21] Dostupné z: <https://flash.desy.de/>
- [28] ARDON. *Jak na nebezpečnou práci s laserem?* [online] [cit. 2021-05-21] Dostupné z: <https://www.ardon.cz/clanek/225/jak-na-bezpecnou-praci-s-laserem-nejdulezitejsi-je-ochrana-kuze-a-oci>
- [29] 10.pdf. *Medicína pro praxi* [online] 2007 [cit. 2021-05-18] Dostupné z: <https://www.medicinapropraxi.cz/pdfs/med/2007/10/10.pdf>
- [30] GIANLUCA Sarri. *Worlds most powerfull laser is 2000watts* [online] 12. 8. 2015 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://theconversation.com/worlds-most-powerful-laser-is-2-000-trillion-watts-but-whats-it-for-45891>
- [31] MASON Besty. *Curiosity roer fires first laser beam at martian rock* [online] 19.8.2012 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://www.wired.com/2012/08/mars-curiosity-rover-fires-first-laser/>
- [32] Technický týdeník [online] 10. 12. 2014 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/vyuziti-laseru-v-prumyslu-minulost-a-soucasnost\\_28291.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/vyuziti-laseru-v-prumyslu-minulost-a-soucasnost_28291.html)
- [33] Dr. RUS Bedřich. *Laser L4 ATON* [online] 2021 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://www.eli-beams.eu/cs/infrastruktura/lasery/laser-4-aton-10-pw-2-kj/>
- [34] O'DONLEY Lory. *ATHENA* [online] 2021 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/athena.html>
- [35] RNDr. KUSALA Jaroslav. *Lasery kolem nás* [online] 2004 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>

- [36] Czechlasers. *Budou lasery pohánět družice* [online] 2018 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/workshop-opticka-vlakna-a-lasery/?kategorie=clanky&search=>
- [37] Laser projector. *Wikipedie otevřená encyklopedie* [online] 7. 4. 2021 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_projector](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_projector)
- [38] Ing. PRIMUS Tomáš. *Technologie svařování laserem* [online] 2018 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/laserovy-den-pro-stredni-skoly/?kategorie=clanky&search=>
- [39] PhD. DAVIS Alex. *Can a laser beam be bent or focused with electromagnetic fields?* [online] 2018 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: <https://www.quora.com/Can-a-laser-beam-be-bent-or-focused-with-electromagnetic-fields>
- [40] Brigham Young University. *Using lasers to create the displays of science fiction* [online] 4. 5. 2021 [cit. 2021-05-22] Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=N12i\\_FaHvOU](https://www.youtube.com/watch?v=N12i_FaHvOU)
- [41] AZADGOLI Beina and Y. BAKER Regina. *Laser applications in surgery* [online] 4. 12. 2016 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5220034/>
- [42] Novinky.cz [online] 29. 4. 2010 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: <https://www.novinky.cz/veda-skoly/clanek/poprvve-v-dejinach-provedl-operaci-srdce-robot-rizeny-na-dalku-33299>
- [43] TEMPELTON Graham. *Here's why we don't have light-based computing just yet* [online] 29. 2. 2016 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: <https://www.extremetech.com/extreme/223671-heres-why-we-dont-have-light-based-computing-just-yet>
- [44] Datacenter. *První integrovaný počítačový systém IBM Quantum Computing pro komerční použití* [online] 21. 1. 2019 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: <https://www.dc-nn.com/prvni-integrovaný-pocitacovy-system-ibm-quantum-computing-pro-komercni-pouziti/>
- [45] TŮMA Jan. *Globální internetová síť se uzavírá* [online] 3. 4. 2018 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/rekordy-podmorskych-opticky-kabelu-nekonci\\_43808.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/rekordy-podmorskych-opticky-kabelu-nekonci_43808.html)
- [46] xIiVZ6.jpg. *Novinky.cz* [online]. 13. 11. 2017 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: [https://d15-a.sdn.cz/d\\_15/c\\_img\\_F\\_J/xIiVZ6.jpeg?fl=cro,0,0,1200,1600%7Cres,1200,,1%7Cwebp,75](https://d15-a.sdn.cz/d_15/c_img_F_J/xIiVZ6.jpeg?fl=cro,0,0,1200,1600%7Cres,1200,,1%7Cwebp,75)
- [47] laserdemo.jpg. *RADA's Radar Selected by a Far-East Country for Its High Energy Laser Program* [online] 18. 1. 2017 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://www.israeldefense.co.il/en/node/28263>
- [48] BĚHAL Ondřej. *Stojí téměř osmdesát tisíc, ale..* [online] 31. 3. 2016 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/stoji-temer-osmdesat-tisic-ale-ridici-zmeni-noc-v-den-zkouse/r~9056f594f74611e5b167002590604f2e/>
- [49] Czechlasers. *Budou lasery pohánět družice?* [online] 2018 [cit. 2021-05-23] Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/workshop-opticka-vlakna-a-lasery/?kategorie=clanky&search=>
- [50] f9499ef227a93933896fa33b806284a7\_resize=560,299\_.jpg. *aktuálně.cz* [online] 31. 3. 2016 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://cdn.xsd.cz/original/f9499ef227a93933896fa33b806284a7.jpg>

- [51] Czechlasers. *Laser* [online] 2018 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/laser-2/>
- [52] tools.jpg. *Gregory Mone* [online] 16. 3. 2012 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://images.ctfassets.net/cnu0m8re1exe/15KVgVBGnTkMtfxmEMCrKp/5ff84ea2907b949226d685455e4ca4df/tools.jpg?fm=jpg&fl=progressive&w=660&h=433&fit=fill>
- [53] DSC01434-1024x683.jpg. *Eli Beamlines* [online] 2021 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://www.eli-beams.eu/wp-content/uploads/2021/01/DSC01434-1024x683.jpg>
- [54] KLAUZ Milan. *3D-MID Elektronické sestavy bez desek plošných spojů* [online] 2021 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:75584/3d-mid-elektronicke-sestavy-bez-desek-plosnych-spoju>
- [55] SPI lasers. *Laser cutting in the semi conductor industry* [online] 2021 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-cutting/laser-cutting-in-the-semi-conductor-industry/>
- [56] URBAN Václav. *Selektivní pájení v elektronice* [online] 2021 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/laserove-selektivni-pajeni-v-elektronice>
- [57] PERNICA Rudolf. *Selektivní pájení laserem* [online] 2019 [cit. 2021-05-24] Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:69915/selektivni-pajeni-laserem>