



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

LASERY A JEJICH VYUŽITÍ V CIVILNÍM / VOJENSKÉM LETECTVÍ

LASERS AND THEIR USE FOR CIVILIAN / MILITARY AERONAUTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Durda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Tomáš Durda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Lasery a jejich využití v civilním / vojenském letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stručný popis principu laseru.
Přehled způsobů současného využití laserů v letectví.
Lasery v civilním letectví.
Lasery ve vojenském letectví.

Cíle bakalářské práce:

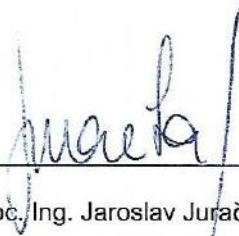
Sudijní pomůcka pro BS oboru Profesionální pilot, LÚ/FSI/VUT (ATPL).

Seznam literatury:

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>.
<http://lasery.wz.cz/>.
<http://www.armadinoviny.cz/vyznamny-pokrok-ve-vyvoji-bojovych-laseru.html>.
<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k34.htm>.
<http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/lasery/node17.html>.
<http://www.osel.cz/7346-mobilni-vojensky-laser-v-akci.html>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 1. 12. 2015



doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu





doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na stručný popis principu laseru, jeho rozdělení dle různých typů a využití laserů v mnoha oborech lidské činnosti. Hlavní část této práce tvoří přehled využití laserových technologií v civilním a vojenském letectví. Ke konci je i stručně popsána perspektiva vývoje laserů do budoucna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laser, princip laseru, laser v praxi, letectví, lasery v civilním letectví, lasery ve vojenském letectví

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on a brief description of a laser's principle, division of many laser types and their usage in practice. The main goal of this thesis was to specify an overview of laser technologies in civilian and military aeronautics. In the end is also described the perspective of laser development in the future.

KEY WORDS

Laser, principle of laser, usage of laser in practice, aeronautics, lasers in civilian aeronautics, lasers in military aeronautics

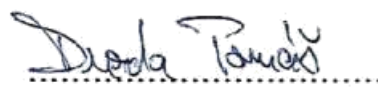
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DURDA, T. *Lasery a jejich využití v civilním / vojenském letectví*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 31 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Lasery a jejich využití v civilním / vojenském letectví* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Slavomíra Voseckého, CSc., a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 23.5.2016


.....
Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval především vedoucímu této práce doc. Ing. Slavomíru Voseckému, CSc. za vedení mé práce, cenné rady a připomínky. Velké poděkování patří i Jaroslavu Záleskému z Univerzity obrany v Brně za poskytnutí cenných materiálů k této práci. Ke konci bych mile rád poděkoval i mé rodině a nejbližším, kteří mi byli po celou dobu studia oporou.

OBSAH

1.	ÚVOD.....	8
2.	CÍLE PRÁCE	9
3.	OBEZNĚ O LASERU	9
4.	HISTORIE LASERU	10
5.	VLASTNOSTI LASERU	10
6.	PRINCIP LASERU	11
7.	ROZDĚLENÍ LASERŮ	13
8.	VYUŽITÍ LASERŮ V PRAXI	15
9.	LASERY V CIVILNÍM LETECTVÍ	20
10.	LASERY VE VOJENSKÉM LETECTVÍ	21
11.	BEZPEČNOST PŘI PRÁCI S LASEREM.....	25
12.	ZÁVĚR.....	26
13.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	27
14.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	30
15.	SEZNAM OBRÁZKŮ	30

1. ÚVOD

Laser je optický kvantový generátor neboli zesilovač světla v rozsahu vlnových délek od ultrafialové až po infračervenou oblast. Princip laseru je založen na stimulované emisi fotonů.

Různé druhy laserů se díky své rozdílné konstrukci a odlišným vlastnostem kategorizují do mnoha skupin dle specifických kritérií.

Od svého objevení v roce 1960 byly laserové technologie díky svým jedinečným vlastnostem postupně rozšířeny do mnoha oborů lidské činnosti a nyní jsou využívány především v průmyslu, medicíně, armádě, nebo i výzkumu.

V letectví se laserové technologie používají hlavně pro vojenské účely. Nejvíce se uplatňují dálkoměry, palubní systémy výstrahy, detektory cíle, naváděcí systémy a laserové zbraně.

Všechny tyto systémy se neustále vyvíjejí a zdokonalují a obzvláště rychle se modernizují laserové zbraně, jejichž převážná část podléhá přísnému utajení.

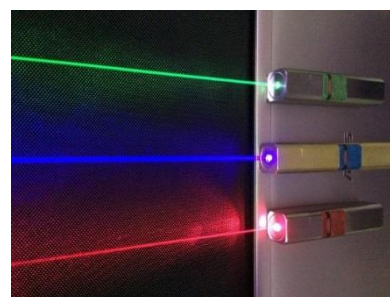
2. CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je popsat princip laseru a uvést přehled způsobů současného využití laserů v civilním a vojenském letectví. Tato práce by měla sloužit jako studijní pomůcka pro bakalářské studium oboru Profesionální pilot, LÚ/FSI/VUT.

3. OBECNĚ O LASERU

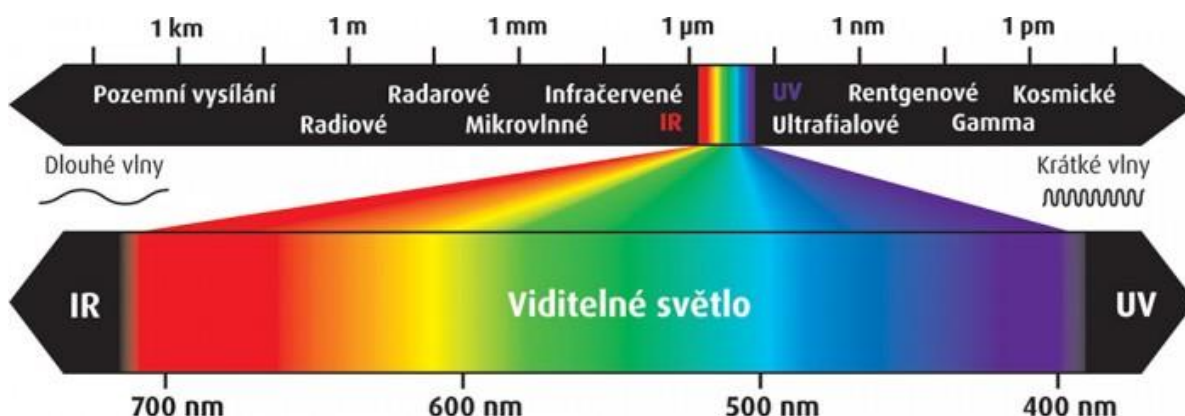
LASER je zkratka z anglického názvu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což v překladu znamená - zesilování světla stimulovanou emisí záření.

Laser je tedy optický zdroj elektromagnetického záření, který dokáže zesílit světelné vlnění a vyzařuje tak světlo v úzkém svazku paprsků, které je na rozdíl od obyčejného světla koherentní¹ a monochromatické². Jedná se o jev, který nastane při interakci fotonu s atomem. Je to poměrně složité zařízení a jeho princip je popsán v následující kapitole.



Obrázek 3.1: Lasery různých barev [3]

Na *Obrázku 3.2* je zvětšeno spektrum viditelného světla. Viditelné světlo je část spektra, na které je lidské oko citlivé. Jednotlivé barvy, které se vyskytují ve světelném spektru, se nazývají spektrálními barvami a náleží jim určité intervaly vlnových délek elektromagnetického záření. Elektromagnetické vlnění v rozsahu od 380 nm do 740 nm je možné vidět jako barvy, od fialové s nejkratší vlnovou délkou, až po červenou s nejdelší vlnovou délkou. Vedle viditelného světla se nachází infračervené záření, které lze cítit receptory v pokožce a směrem do kratších vlnových délek se nachází ultrafialové světlo, které se na člověku projevuje opálením [1], [2], [4], [5].



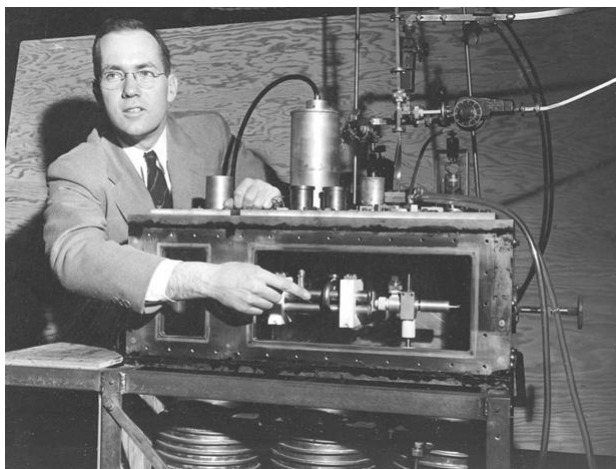
Obrázek 3.2: Spektrum viditelného světla [4]

¹ **Koherentní světlo** je tvořené jednou vlnovou délkou a stejnou fází. Vlnění se téměř nerozbíhají.

² **Monochromatické světlo** tvoří pouze jedna barva, tedy záření o stejné vlnové délce. Na rozdíl od obyčejného světla, které vypadá po splynutí všech barev jako bílé, protože je složeno ze všech vlnových délek.

4. HISTORIE LASERU

Albert Einstein již v roce 1917 na základě termodynamických a statistických úvah předpověděl možnost stimulované emise záření. Až v roce 1956 zprovoznili Townes a Schawlow první **MASER**³, předchůdce laseru. Je to zařízení, které funguje na stejném principu jako laser, ale s tím rozdílem, že generuje mikrovlnné záření. O dva roky později dokázali Townes a Schawlow možnost rozšířit frekvenční pásmo MASERu do oblasti světla, za což později obdrželi Nobelovu cenu. V roce 1960 Theodore H. Maiman jako první získal emisi laserového světla, a to z rubínového krystalu a o rok později se již záření tohoto laseru používalo k léčení očních a kožních onemocnění [2], [6].



Obrázek 4.1: Townes demonstrující svůj maser [8]

5. VLASTNOSTI LASERU

- Vysoký výkon
- Velmi přesné zaostření
- Velká hustota přenášené světelné energie
- Monochromatický a koherentní paprsek
- Polarizovaný paprsek
- Podle bezpečnosti se dělí do čtyř tříd (viz kapitola 11)



Obrázek 5.1: Laserové paprsky různých barev[7]

Existuje mnoho podob laseru. Jejich rozměr se mění od mikroskopického (např. nanotrubicový laser) až po rozměr velké budovy. Výkon těchto laserů se pohybuje od hodnot menších než mikrowatt až do petawattů. Tento výkon byl dosažen laserem v Lawrence Livermore Laboratory v USA. Jedná se o výkon větší než veškerá spotřeba populace USA [34].

Díky různým druhům laserů s výše uvedenými vlastnostmi se v současné době používají laserové systémy v mnoha oborech lidské činnosti. Neustále dochází ke zdokonalování laserových technologií a jejich zavádění do běžné praxe. Díky svým jedinečným vlastnostem se staly součástí našeho každodenního života, aniž bychom si to někdy uvědomovali.

³ **MASER** (Microwawe Amplification by Stimulated Emission of Radiation.)

6. PRINCIP LASERU

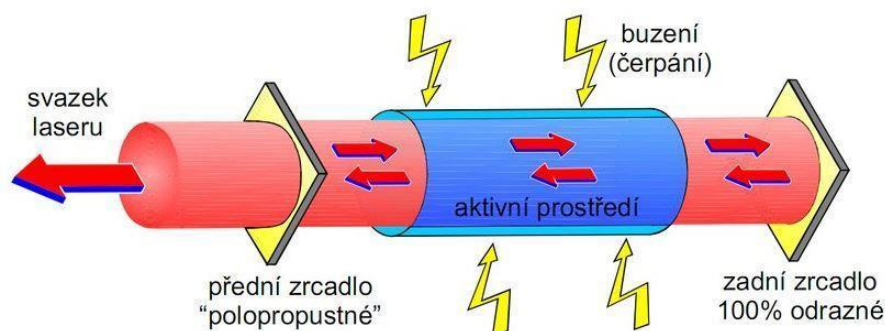
• HLAVNÍ SOUČÁSTI LASERU

Základní částí laseru je **aktivní prostředí**, látka, která obsahuje oddělené kvantové energetické hladiny elektronů. Může být použito několik druhů aktivního prostředí.

Buzení, které dodává energii aktivnímu prostředí, může být vyvoláno např. elektrickým proudem, chemickou reakcí, nebo výbojkou.

Další důležitou součástí laseru je **rezonátor**. Ten tvoří dvě rovnoběžná zrcadla, která jsou zároveň kolmá na osu laseru. Jedno zrcadlo je nepropustné a druhé je polopropustné, které propouští fotony až při větší intenzitě záření.

Mezi **příslušenství** k laseru patří např. chlazení, které odvádí přebytečné teplo z aktivního prostředí. Používá se při vyšších výkonech a bez něho by došlo k nenávratnému poškození celého zařízení. Jako další příslušenství lze použít měřič výkonu, kalibrační přístroje, nebo případně nelineární krystal, který je schopný měnit vlnovou délku [1], [2], [7].



Obrázek 6.1: Součásti laseru [7]

• PRINCIP LASERU

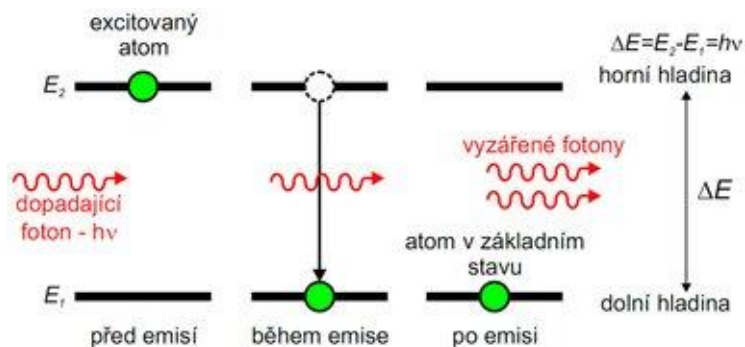
Princip laseru je poměrně složitý a využívá mnoho fyzikálních zákonů. Z názvu LASER je patrné, že toto zařízení pracuje na principu stimulované emise fotonů. Celý princip laseru se však skládá z více kroků, ke kterým musí dojít, aby byl vygenerován laserový paprsek.

Aktivní prostředí vždy obsahuje element, který se může nacházet ve stavu s nižší energií, nebo ve vybuzeném (excitovaném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem bývá nejčastěji atom, ale může se jednat i o chemickou vazbu nebo vibrační stav molekuly. Připomeňme, že k emisi nebo absorpci energetického kvanta optického záření, tj. fotonu, dochází spolu se změnou energetického stavu látkové částice. Při absorpci foton zaniká a částice přechází z nižší energetické hladiny na vyšší. Při emisi je tomu naopak, částice přechází z vyšší hladiny na nižší a vzniká nový foton. V případě indukované emise je uvedený přechod vyvolán vnějším fotonem, který při interakci zachovává svoji existenci a nově vyzářenému fotonu „předává“ své vlastnosti. Pokud budou fotony dva, ve výsledku poletí fotony stejným směrem a budou mít stejnou vlnovou délku, fázi a směr. Proto se spojí a vytvoří jednu vlnu s dvojnásobnou amplitudou a dvojnásobnou energií. Aktivní prostředí laseru musí obsahovat

tzv. metastabilní hladinu. Musí být opticky průzračné a opticky homogenní, chemicky stabilní, tepelně odolné a technologicky vyrobitelné. Na metastabilní hladině vydrží elektron daleko déle, a tím je zaručena interakce s dalším fotonem.

Nezbytným předpokladem generace laserového záření je inverzní populace mezi dvěma energetickými hladinami v aktivním prostředí. **Stav populační inverze** nastává tehdy, nachází-li se více elektronů atomu na metastabilní hladině, než na hladině základní.

Jakmile dorazí stimulující foton na metastabilní hladinu, donutí všechny elektrony sestoupit na základní hladinu a vypustit jeden

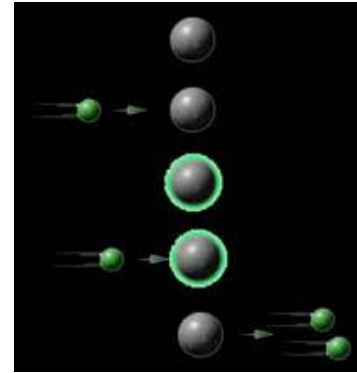


Obrázek 6.3: Stimulovaná emise záření [29]

proběhne ta samá interakce. Všechny elektrony se nyní nacházejí na **metastabilní hladině**. Poté k nim přiletí stimulující foton a každý z nich vypustí zesílené fotony, avšak každý jiným směrem. Tyto fotony poté působí pro ostatní jako stimulující, které donutí ostatní elektrony přesunout se zpět a vypustit další fotony, které se přidají ke stimulujícím. Tímto způsobem dochází k zesilování světla. Laser však stále nefunguje, protože fotony létají do různých směrů.

V **rezonátoru** se hromadí fotony letící rovnoběžným směrem s osou laseru, odrážejí se od zrcadel a udržují se tak v aktivním prostředí. Fotony letící jiným směrem zanikají a laser začíná fungovat. Kdyby aktivní prostředí neobsahovalo atomy s metastabilní hladinou, fotony které letí špatným směrem by byly vypouštěny tak rychle, že by je správně letící fotony nestíhaly strhávat s sebou a laser by poté nefungoval.

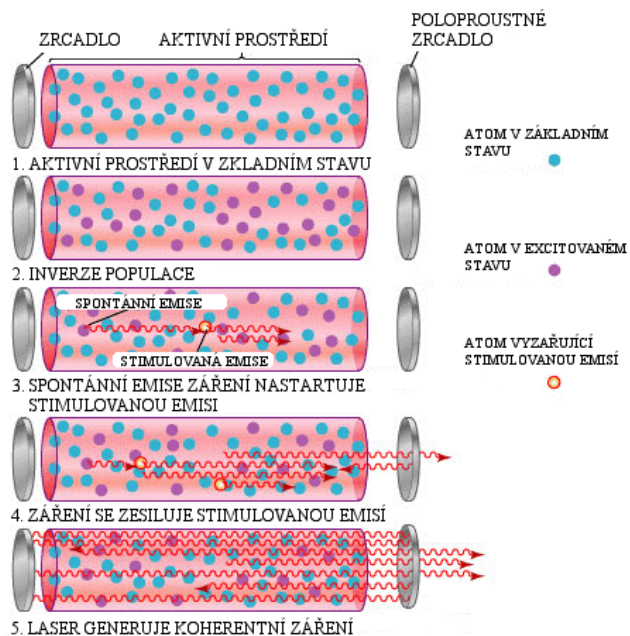
Poté co bude foton zesílen na určitou úroveň, polopropustné zrcadlo ho vypustí ven a vzniká tak požadovaný laserový paprsek. Celý tento proces však proběhne v řádech milisekund [1], [4], [29].



Obrázek 6.2: Interakce fotonu a elektronu [1]

foton. Všechny tyto fotony, včetně stimulujícího jsou následně spojeny v jednu vlnu, která má mnohem větší amplitudu. Tímto dochází k zesílení světla stimulovanou emisí záření. Tato vlna však prozatím nemá potřebný směr a proto nemůže fungovat.

V praxi se počet atomů mnohonásobí a v každém z atomů



Obrázek 6.4: Princip laseru [29]

7. ROZDĚLENÍ LASERŮ

I když všechny lasery fungují na podobném principu, liší se poměrně výrazně svojí konstrukcí i vlastnostmi. Lze je tedy dělit do několika skupin dle různých kritérií.

- **Podle druhu aktivního prostředí**

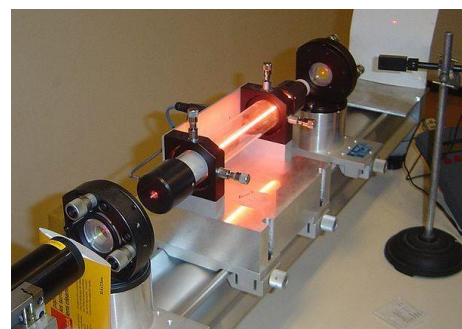
- Pevnolátkové - Aktivní prostředí je většinou tvořeno monokrystalem. Tyto lasery mohou pracovat v různých režimech a za různých provozních podmínek.

Jsou stabilní a mají minimální nároky na údržbu. Nejpoužívanější pevnolátkový laser je tvořený syntetickým rubínem. Maimanovi se podařilo dosáhnout prvního laserového paprsku červeného světla právě pomocí rubínové tyčinky. V dnešní době je nejrozšířenější také neodymový laser, který má uplatnění v mnoha oborech.



Obrázek 7.1: Pevnolátkový laser Nd-YAG [9]

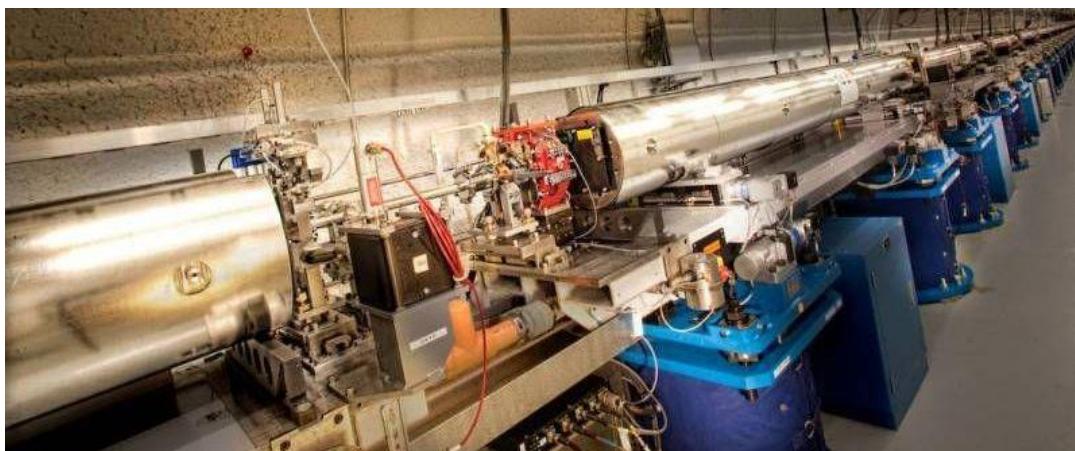
- Plynové – Aktivní prostředí je složeno z jednoho či více plynů. Díky homogennímu prostředí mají tyto lasery skvělé parametry, nevýhodou je však poměrně malý výkon. Pracují v pulsním i kontinuálním režimu. K nejrozšířenějším plynovým laserům patří helium-neonový laser (viz *Obrázek 7.2*), argonový, nebo helium-kadmiový laser.



Obrázek 7.2: Helium-Neonový laser [11]

- Kapalinové – Tento druh laseru je nejčastěji tvořen aktivním prostředím s vodným či alkoholovým roztokem organického barviva. Lze u nich plynule měnit jejich vlnovou délku a díky tomu se využívá ve spektroskopii. Nevýhodou kapalinových laserů je jejich krátká životnost, která je způsobena rozkladem aktivního prostředí.
- Polovodičové – Polovodičové neboli diodové lasery patří dnes mezi nejpoužívanější. Zdrojem záření je tzv. laserová dioda, jejíž výhodou je vysoká účinnost a integrovatelnost s elektrickými součástkami a její výkon lze snadno měnit pouhou změnou elektrického proudu. Nevýhodou je však větší rozbíhavost paprsku oproti jiným typům laserů.
- Lasery s volnými elektrony - Neboli FEL (free electron laser) využívající magnetické pole, které je tvořeno periodickou soustavou magnetů střídavé polarity. Svazek elektronů pohybující se v magnetickém poli tvoří aktivní prostředí.

- Plazmové rentgenové lasery - Tyto lasery se začaly vyvíjet až poměrně nedávno, protože je velmi obtížné dosáhnout laserové činnosti v rentgenové části elektromagnetického spektra. Výhodou těchto laserů je obrovská energie, která je využívána ke vzniku plazmy či k odpařování těžko tavitelných kovů.
 - Excimerové lasery - Jsou nejdůležitějšími plynovými lasery pro ultrafialovou oblast. Zařízení tohoto typu má minimální absorpční hloubku ve tkáni a proto je využíváno k odstraňování mikroskopických vrstev tkáně [1], [2], [7], [9], [13].
- **Podle excitace (buzení) aktivního prostředí**
 - Optickým zářením - světelný záblesk jako zdroj energie k vytvoření paprsku
 - Elektrickým polem - k elektrickému výboji dochází v plynové náplni laseru
 - Chemickou reakcí - tyto lasery jsou schopné vydat ohromné množství energie v krátkém časovém okamžiku a jsou používány armádou především pro vojenské účely
 - Elektronovým svazkem [1], [7], [9], [13].
-
- **Podle vlnové délky**
 - Infračervené lasery
 - Lasery v oblasti viditelného světla
 - Ultrafialové (UV) lasery
 - Rentgenové lasery - Stanfordský lineární urychlovač, tři kilometry dlouhý, nejsilnější rentgenový laser na světě (viz *Obrázek 7.4*). Jde o první rentgenový laser, který je schopen proniknout pevným kovem a „prosvítit“ jej [7], [9], [12].
- **Podle časového režimu provozu**
 - Kontinuální režim
 - Pulsní režim



Obrázek 7.4: Stanford Linear Accelerator Center [12]

8. VYUŽITÍ LASERŮ V PRAXI

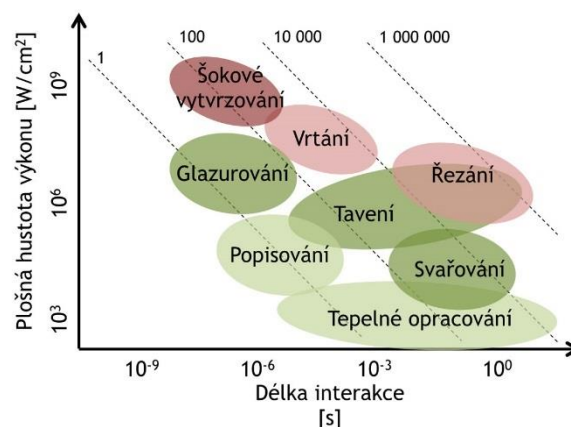
Laser je díky svým unikátním vlastnostem v dnešní době velmi hojně využíván. Za více než padesát let své existence se stal nedílnou součástí našich životů a využívá se ve všech různých oborech lidské činnosti.

- **Lasery v průmyslu** – Prakticky ihned po sestavení prvního laseru se začalo laserové záření využívat v tomto odvětví. Koherentní paprsek s obrovskou energií a přesností je schopný zpracovávat kovové i nekovové materiály s prvotřídní kvalitou a zcela novými technologickými postupy. Výhodou je rychlost zpracování, velmi dobrá kvalita výsledné plochy bez nutnosti dokončovacích technologií nebo modifikovatelnost.

- Obrábění materiálů - Využití laseru jako řezného a vrtného nástroje je jednou z jeho hlavních aplikací. V místě kde dopadá laserový paprsek, se materiál taví a je z řezu „odfukován“ proudem inertního plynu a tím nevzniká téměř žádný odpad a materiál ani nemusí být upnut. Díky tomu se dají s vysokou přesností řezat i křehké nebo lehce deformovatelné materiály, například textil. Při řezání diamantu laserem teplota v jeho okolí dosahuje až 50 000 °C.
- Svařování kovů - Při svařování se nejčastěji používají CO₂ a Nd: YAG lasery.

Laserový paprsek je možné vést tak, aby byla dosažena vysoká rychlost sváření, až 20 metrů za minutu. Působení paprsku je pouze lokální, takže nedochází k tepelnému poškození okolí svařovaného místa. Nejvhodnějšími materiály na svařování laserem jsou nerezavějící ocel, titanové, zirkonové nebo chromniklové slitiny.

- Značení a gravírování - Paprsek laseru dokáže na povrchu materiálu vytvořit mechanicky odolný, velmi přesný a kontrastní popis. Je možné značit prakticky jakýkoliv kovový i nekovový materiál. Změnou parametrů laseru je možné plynule měnit hloubku popisu od tisícín milimetru až po gravírování do větší hloubky. Nejdůležitějším faktorem v technických aplikacích je trvanlivost popisu, v reklamních aplikacích je kladen důraz spíše na grafickou kvalitu značení.
- Zaměřování a měření vzdálenosti - Používá se k vytyčování a zaměřování objektů na staveništích nebo v geodézii. Např. laserová vodováha nebo přímočará pilka se zaměřovacím paprskem pro přesné řezání. Laserovým paprskem lze měřit i vzdálenost družic nebo Měsíce od Země, kde je měřena doba mezi vysláním a přijetím světelného impulzu.



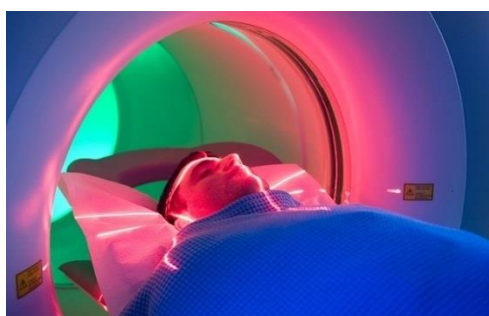
Obrázek 8.1: Laser pro průmyslové aplikace [17]

- Mezi další aplikace laserového paprsku v průmyslu patří laserová litografie nebo např. odstraňování koroze. Tato novinka (viz *Obrázek 8.2*) od kanadské firmy Adapt Laser Systems je nejsilnější ruční laserový čistič koroze na trhu. Jeho laser má úctyhodný výkon 1000 W. Paprsek spadá do třídy č. 4, tedy nejvyšší a potenciálně nejnebezpečnější, který je schopný trvale poškodit kůži nebo zrak. Přístroj na obrázku je pouze menší část celého stroje, který je propojený optickými kabely, které mohou dosahovat délky až 45 metrů, s větší částí stroje. Ta je mobilní a má integrované vzduchové chlazení a váží téměř půl tuny [14], [15], [16].

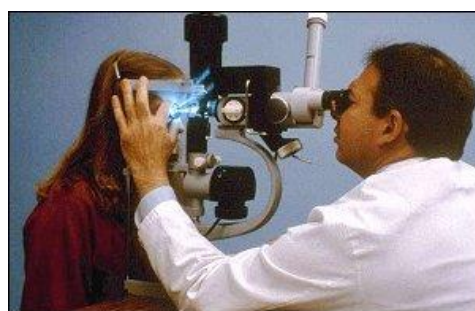


Obrázek 8.2: Lasersystem CL 1000 [15]

- **Lasery v medicíně** – Laserový paprsek je využíván v medicíně k mnoha zákrokům v rámci tzv. fototerapie. První zákroky, mezi které patří korekce vad zraku, nebo vyhlazování jizev, byly provedeny už v 70. letech 20. století. Až nástupem třetího tisíciletí se rozšířilo pole působnosti laseru v medicíně a v dnešní době se toto odvětví nazývá laserová chirurgie. Pro lékaře bylo hlavními důvody použití laseru možnost koncentrace světla na malou plochu a možnost řezání tkání malými řezy bez poškození okolí. Při řezání nedochází k dotyku s tkání a tím se zabrání zanesení infekce do rány. Energie při řezání se ve tkáních pohlcuje a mění se na teplo. Tato technika má několik výhod jak v šetrnosti, tak v bezpečnosti při operacích.
 - Oční operace (viz *Obrázek 8.4*) se provádí excimerovým laserem, označovaným zkratkou LASIK. Další oblasti využití laserového paprsku v medicíně jsou např. dermatologie, neurochirurgie, onkologie, stomatologie, laserová terapie při poruchách pohybového ústrojí a kloubových poruch, smyslových a vnitřních orgánů [11], [14], [16], [17].

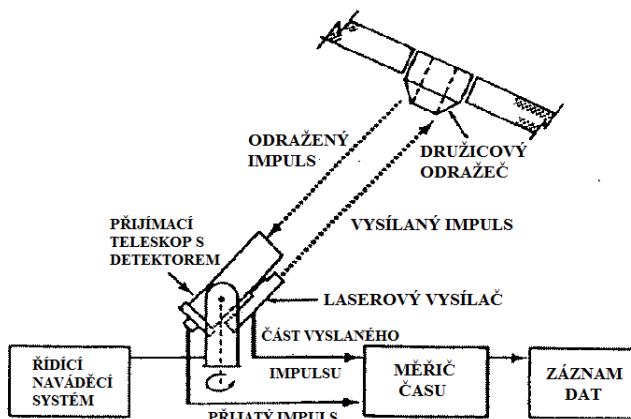


Obrázek 8.3: AKELA Laser [18]



Obrázek 8.4: Laserová operace očí [14]

- Lasery v astronomii, geodézii, geofyzice a ekologii** – Poměrně brzy po zavedení laseru do praxe, se začal používat v systému radaru, jako vysílač záření. Zde je využita jeho malá rozbíhavost a schopnost generovat velmi krátké impulsy. Jako laserové vysílače se používají impulsní pevnolátkové lasery. Pomocí tzv. laserového radaru (viz *Obrázek 8.5*) se měří vzdálenost k objektům na základě odrazu světla od družicového odražeče, který bývá většinou ve tvaru koutového hranolu. Pro určení vzdálenosti je změřen časový interval mezi vysláním impulsu



Obrázek 8.5: Schematické znázornění měření vzdálenosti umělých družic Země [19]

optického záření a okamžikem návratu odraženého impulsu od měřeného objektu. Pro měření objektů bez laserových odražečů je dosah radaru do 20 km a nejvzdálenějším objektem, který byl změřen, je laserový odražeč umístěný na povrchu Měsíce. Přesnost měření vzdálenosti pomocí tohoto radaru je dána několika faktory (délkou vyslaného impulsu, přesností změření časového intervalu, geometrií a konstrukcí měřeného objektu) a pohybuje se od několika decimetrů pro měření objektů bez odražeče, až k milimetrovým hodnotám při měření družic Země. Four Laser Guide Star Facility v Chile (viz *Obrázek 8.6*) vyzařuje čtyři lasery o výkonu 22 wattů, které poskytují viditelnější pohled do vesmíru a umožňují tak teleskopu pořídit ostřejší snímky vesmíru.



Obrázek 8.6: Four Laser Guide Star Facility [20]

- V geodézii a geofyzice se uplatnily lasery helium-neonové a jsou využívány k vytyčování tras na zemském povrchu i v podzemí, při studiu zemětřesení, nebo měření vzájemného pohybu zemských kontinentů.
- V ekologii se využívají pozemní laserové radary (tzv. LIDARY) k měření znečištění zemského ovzduší. K tomuto měření se využívá nejen odrazu paprsku, ale i jeho rozptylu. Lidarem se také měří oblačnost, nebo proudění vzduchu a jeho turbulence v atmosféře. [1], [19], [20].

- **Vojenské aplikace laserů**

- Laserové navádění – Slouží k přesnému změření vzdálenosti cíle, jeho polohy a stanovit tak optimální balistickou dráhu ničící střely a tím i zvýšit spolehlivost zásahu. V této oblasti se obvykle využívají impulsní Nd:YAG laserové systémy. Laserové zaměřovače se využívají na zbraních pro viditelné a přesné označení cíle. Další využití je pro navádění letadel při přistání na improvizovaných letištích či letadlových lodí.
- Prevence bojových plynů - Měří se koncentrace bojových látek v ovzduší.
- Laserové zbraně – Jsou nejlepším způsobem jak chránit vzdušný prostor. Jsou schopné zasáhnout cíl na vzdálenost několik desítek kilometrů ve zlomku vteřiny. Jejich přesnost a potenciál přenést na cíl obrovské množství energie, dělá z laseru zbraň budoucnosti. V posledních letech byly však laserové zbraně spíše předmětem vývoje a testování. V současné době se tyto zbraně pomalu dostávají do ostrého nasazení. Příkladem je námořní laser LaWS (Laser Weapons System), který dosahuje výkonu 30 kW. Americké námořnictvo plánuje už v roce 2018 nasadit zbraň o výkonu 100 až 150 kW.

V protiletadlové a protiraketové ochraně pozemních jednotek americké armády probíhá vývoj vysokoenergetického mobilního demonstrátoru (viz *Obrázek 8.7*). Jedná se o polovodičový laser a ve výrobě už je i 100 kW varianta této zbraně. Dokáže účinně bojovat proti řízeným střelám, balistickým raketám, nebo přesně naváděným pumám. Jeví se také jako jediný efektivní prostředek v boji proti dronům.

Laser v armádě nemusí nutně sloužit k likvidaci nebo zaměření nepřítele, ale funguje i jako obranný nástroj. Laser GLEF (viz *Obrázek 8.8*) dokáže pomocí širokopásmového zeleného paprsku jednoduše oslepit nepřítele, který není schopen dalšího pohybu.

Do budoucna budou laserové zbraně ještě přesnější, výkonnější a využívány pro více účelů jak v armádě, tak v námořnictvu [17], [23], [24], [25].



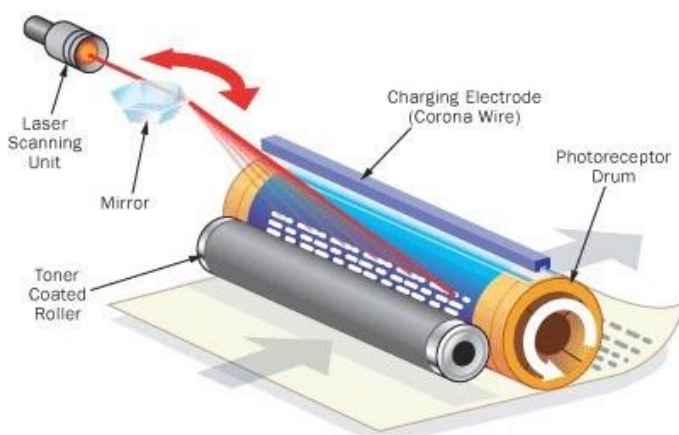
Obrázek 8.7: HEL MD (High Energy Laser, Mobile Demonstrator) [21]



Obrázek 8.8: GLEF (Green Light Escalation of Force) system [22]

- **Lasery v každodenním životě** – S lasery se setkáváme prakticky každý den, aniž bychom si to uvědomovali. Do budoucna se pole působnosti laserů s největší pravděpodobností bude nadále rozšiřovat. Lasery budou výkonnější, přesnější a jejich energie se bude využívat v mnoha dalších odvětvích. Bude nadále i velkým pomocníkem v oblasti výzkumu. Mezi nejpoužívanější aplikace laserů patří:

- Optická záznamová média (CD, DVD, Blue-Ray) - Záznam na kompaktním disku je tvořen velkým počtem pití (prohlubní) na lesklé ploše disku. Šířka záznamové stopy je pouze několik mikrometrů.
- Laserové tiskárny - Laserový paprsek vytváří elektrostatický „obraz“ na válci citlivém na světlo. Obraz je pak z válce přenesen ve viditelné formě na papír.
- Laserové zaměřování a měření vzdálenosti
- Laserové ukazovátko
- Čtečka čárového kódu
- Bezpečnostní aplikace
- Optické komunikace
- Policejní radary
- Laserové show
- Laser game
- Hologramy -



Obrázek 8.9: Princip laserové tiskárny [26]

Holografie je způsob optického zobrazování, založený na interferenci a ohybu světelných svazků. Jeden paprsek dopadá po odrazu od zrcadla přímo na film a druhý paprsek se odrazí od zobrazovaného předmětu a teprve poté dopadá na film. Nevznikne žádný viditelný obraz, nýbrž zdánlivě neuspořádaná soustava interferenčních proužků. Na rozdíl od běžné fotografie vytváří hologram skutečný trojrozměrný obraz, který se při osvětlení mění při pohledu z různých stran. Největší uplatnění našly v oblasti ochrany proti napodobení nebo padělání (občanské průkazy, identifikační karty, eurobankovky, atd.) [14], [16], [17].

- **Laser jako součást výzkumu** - Pražská laserová laboratoř PALS (viz *Obrázek 8.10*) patří mezi největší laserové systémy na světě.

Naopak nejsilnější laser na světě bude spuštěn v roce 2018 v Dolních Břežanech. Jmenuje se Krakatit a jeho výkon bude úctyhodných 10 PW. Bude sloužit k výzkumu léků, pevných látek, nebo při vývoji součástek pro elektroniku [1], [28].



Obrázek 8.10: Prague Asterix Laser System [27]

9. LASERY V CIVILNÍM LETECTVÍ

Laserové systémy v civilním letectví nejsou v současné době příliš využívány, neboť jejich zásadní všeobecnou nevýhodou je závislost na stavu atmosféry, která negativně ovlivňuje všechny optické systémy. V krajním případě může atmosféra zcela znemožnit použití optických zařízení. Proto jsou využívány pouze jako doplňkové systémy nejčastěji v kombinaci s jinými, např. infračervenými systémy.

V civilním letectví se už od 70. let minulého století začaly používat **laserové dálkoměry** k měření délky pozemních objektů a jsou využívány v kombinaci s jinými technologiemi i v současnosti. Mají však větší uplatnění ve vojenském letectví.

Mezi další aplikaci patří mapování terénu, neboli **letecké laserové skenování** reliéfu pomocí **LIDARu** (Light Detection and Ranging). Jedná se o metodu dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu doby šíření pulsu laserového paprsku, který se odrazí od snímaného objektu. Je to velmi mladá technologie, která umožňuje sběr bodů pro tvorbu digitálního modelu reliéfu terénu, a to i v zalesněných oblastech krajiny. Nahradila tak standardní metody (tachymetrie, GPS, fotogrammetrie).

Ačkoliv je tato technologie poměrně mladá, našla své uplatnění v mnoha aplikacích, například analýza vegetačního pokryvu, tvorba 3D modelu města, mapování pobřežních vod, nebo sledování nadzemních vedení.

Celý přístroj obsahuje zdroj laserového záření, optickou soustavu, mechanický prvek, detektor elektromagnetického záření a velmi přesné hodiny. Jako zdroj laserového záření lze v současnosti využít poměrně velikou škálu různých emitörů. U výkonných lidarů se používají pevnolátkové lasery rubínové nebo modernější Nd:YAG. V systémech, kde není zapotřebí vysoký výkon, se používají lasery diodové.

Letecký laserový skener (ALS – Airborne Laser Scanner) se dá zařadit mezi aktivní digitální senzory, poskytující přesnost, rychlost a možnost operativního použití. Celý proces měření a následného zpracování dat je z poměrně velké části automatizován. Všechna data jsou získána již v digitální podobě, což usnadňuje a urychluje jejich vyhodnocení [35].

Podstatně větší využití optických systémů než v civilním letectví tvoří významnou součást avionického vybavení soudobých vojenských letadel. Lze předpokládat, že v budoucnu se některé osvědčené aplikace laserových systémů z vojenského letectví začnou využívat i v civilním letectví.

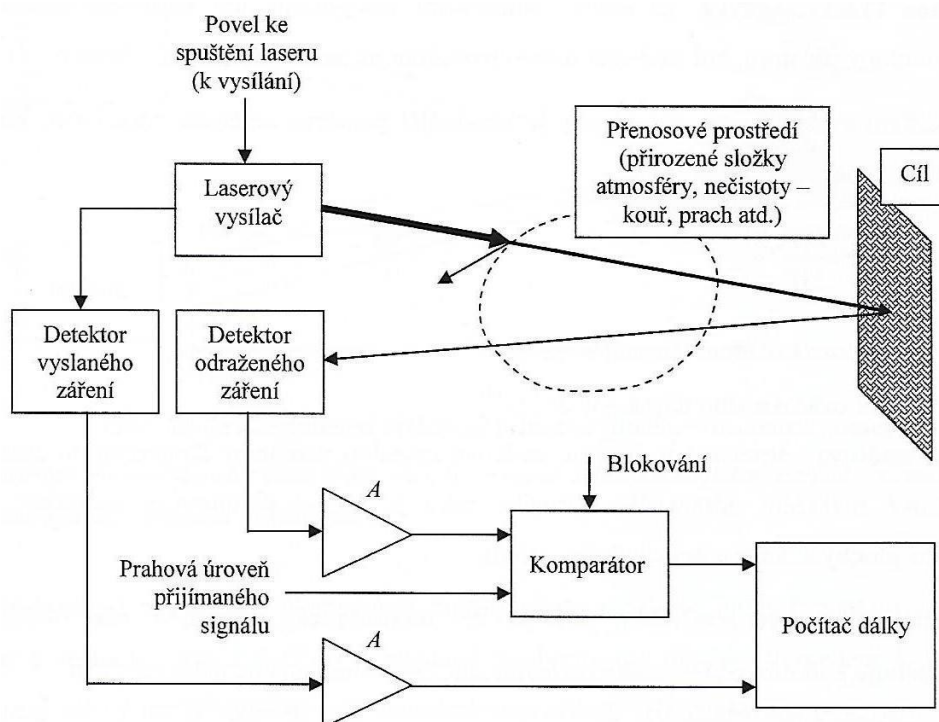
10. LASERY VE VOJENSKÉM LETECTVÍ

Využití laserů a laserových systémů ve vojenském letectví je v současné době daleko rozšířenější než u civilního letectví. Tvoří významnou součást vybavení soudobých vojenských letounů, a proto je nutné těmto systémům věnovat velkou pozornost při vzdělávání specialistů inženýrské letecké služby.

• OPTICKÁ LOKACE

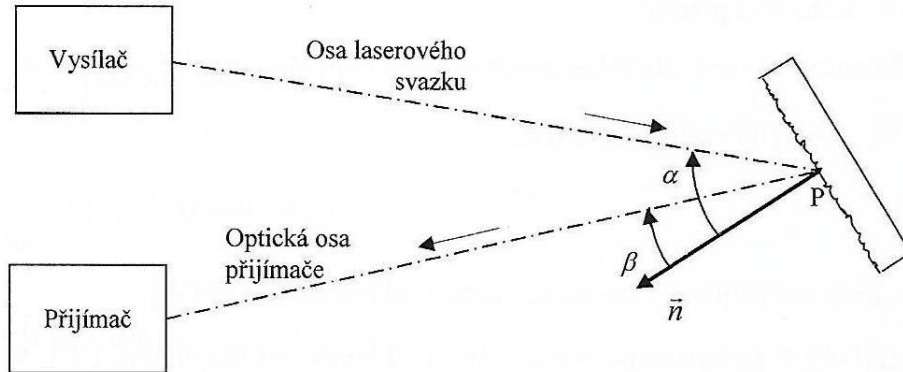
Laserové aktivní optické lokátory slouží k vyhledávání objektů (překážek, cílů, atd.) a k měření jejich polohových souřadnic a parametrů pohybu pomocí laserového záření vysílaného definovaným způsobem do určitého prostoru a detekovaného přijímačem po odrazu od ozářeného objektu. Laserové lokátory jsou také využívány na vrtulnících k výstraze před nebezpečnými překážkami, jako jsou například vodiče vysokého napětí. Nejčastěji se využívají pevnolátkové lasery s ionty neodymu nebo plynové na bázi oxidu uhličitého.

K nejrozšířenějším prostředkům laserové lokace používaným na vojenských bojových letounech patří **dálkoměry**, které jsou určeny k měření délky pozemních nebo vzdušných cílů. Dálkoměry, které slouží k lokaci vzdušných cílů, mohou být integrovány s infračervenými zaměřovači do jediného systému, kterými lze měřit nejen délku, ale také úhlové souřadnice nebo složky úhlové rychlosti cíle. Nejvyspělejší systémy mohou poskytovat komplexní informaci o tvaru, pohybu i poloze objektu [32], [33].



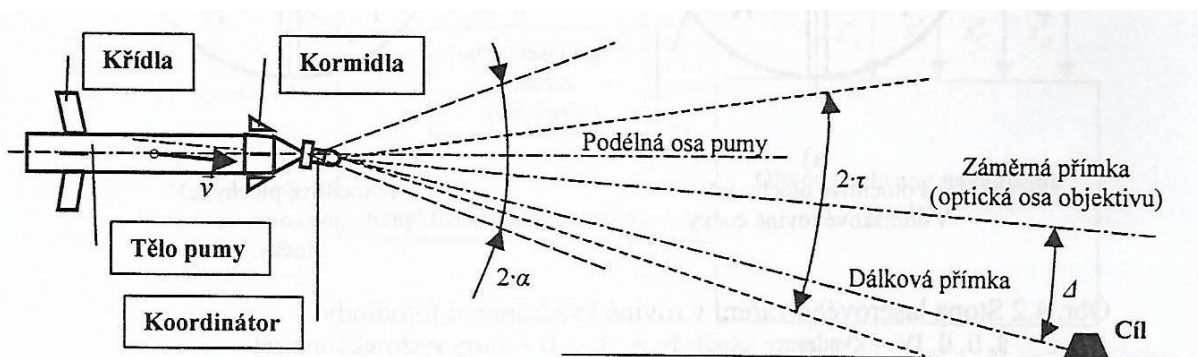
Obrázek 10.1: Principiální blokové schéma laserového dálkoměru [33]

Do okruhu prostředků laserové lokace se dají zařadit i **palubní systémy výstrahy** před napadením protivníkem a **laserové detektory cíle**, které jsou běžnou součástí nekontaktních zapalovačů soudobých protivzdušných řízených střel. K této činnosti postačují polovodičové lasery.



Obrázek 10.2: Obecný systém laserové lokace [33]

Laserové naváděcí systémy (LNS) letecké munice využívají k měření odchyly cíle, resp. odchyly koordinátoru laserového záření. Odchyly cíle rozumíme úhel, který svírá osa koordinátoru – záměrná přímka s dálkovou přímkou (viz *Obrázek 10.3*). LNS se rozdělují na poloaktivní a aktivní. Aktivní se v současné době nacházejí jen na několika typech řízených střel. Naopak poloaktivní naváděcí systémy (PLNS) jsou poměrně rozšířené. Jsou používány u protizemní munice, a to jak u protizemních řízených střel, tak i leteckých řízených pum. Primární funkcí v procesu měření odchyly je polohově závislá detekce laserového záření odraženého od cíle. Tuto funkci uskutečňuje optický koordinátor, který se skládá z optického aerodynamického krytu, optické soustavy, kvadrantové fotodiody a systému řízení polohy. Zdrojem záření jsou nejčastěji pevnolátkové lasery typu Nd:sklo nebo Nd:YAG, které pracují na vlnové délce, $1,06 \mu\text{m}$ v impulsním režimu. Tyto lasery jsou součástí ozařovacích systémů, které pro potřeby navedení letecké munice mohou být jak pozemní, tak palubní (letecké). Na *Obrázku 10.3* je naznačeno umístění koordinátoru na těle řízené pumy a jeho stabilizace ve směru vektoru rychlosti [31], [32], [33].



Obrázek 10.3: Měření odchyly cíle [32]

v - vektor rychlosti řízené pumy, Δ - odchyly cíle, $2 \cdot \alpha$ – rozsah úhlových výchylek koordinátoru, $2 \cdot \tau$ – úhlové zorné pole koordinátoru

- **LASEROVÉ ZBRANĚ**

Laserové zbraně jsou v současné době spíše předmětem vývoje a testování. Slibují však zásadní revoluci ve vzdušných soubojích. V posledních letech se výrazně zvýšil počet programů testujících tyto zbraně. Stávají se čím dál více populární díky velkému pokroku ve zlepšování účinnosti a zmenšování jejich rozměrů.

Za zmínku stojí projekt **ABC** (Aero-adaptive Aero-optic Beam Control), na kterém se podílejí výzkumné laboratoře amerického letectva **AFRL** (Air Force Research Laboratory), nebo společnost Lockheed Martin.

V rámci tohoto projektu je testována střelecká věž, která je schopna zacílit laserový paprsek do všech směrů kolem letadla. V budoucnu by tak mohla ničit veškeré cíle kolem letadla. Teoreticky tak letadla vybavená laserovou věží nebude možné zničit klasickým způsobem za použití střel vzduch-vzduch nebo země-vzduch. Obrovskou výhodou těchto zbraní, je i jejich ekonomická nenáročnost, kde jeden výstřel laseru stojí pouze několik set dolarů. Nastávají však i komplikace při vývoji a testování těchto zbraní. Laserový paprsek je ovlivněn řadou jevů v atmosféře, které způsobují problémy při testování. Jedná se především o mlhy, bouřky, větrné víry nebo i turbulence, které mají značný vliv na laserový paprsek. Ty dokáží vyvolat ohyb a mihotání laseru, což má za následek pokles efektivity této zbraně.



***Obrázek 10.4:** Testování laserové střelecké věže ABC na malém obchodním letadle [35]*

Americké letectvo se nyní podílí na pozemních testech výkonného laseru **HEL** (High Energy Laser). V další etapě testovacího programu budou nainstalovány laserové zbraně na stíhací letouny a budou umístěny v kontejnerech a zavěšeny pod trupem letadla. Konečným cílem projektu je zabudovat tyto zbraně přímo do trupu letounu. Letectvo má v plánu nainstalovat tyto zbraně na pilotovaná i bezpilotní, podzvuková i nadzvuková letadla. První letecký test je naplánován na rok 2023. Z počátku letouny obdrží lasery o výkonu několik set kW a cílem bude tento výkon postupně zvyšovat. Lasery budou schopny během letu provést až několik tisíc výstřelů a elektrickou energii jim bude dodávat palubní proudový motor [36], [37], [38].

Současné testované lasery mají výkon několik desítek kW, nicméně pro operační nasazení je nutné nasazení laserů o několika násobně větším výkonu.

Výhoda těchto laserových zbraní bude skutečně masivní jen do té doby, než jejich nasazení do výzbroje dokáže i protivník.

Testování a vývoj leteckých zbraní je každopádně i ekonomicky velmi náročné, je tedy možné, že lasery propadnou do ekonomické a vědecké pasti. Pokud se tak ale nestane, lze předpokládat, že rok 2020 bude velmi významným rokem v této oblasti použití.



Obrázek 10.5: Kapalinou chlazený pevnolátkový vysokoenergetický laserový systém od společnosti General Atomics Aeronautical Systems (GA-ASI) demonstrováný na nynějším US Air Force [39]

11. BEZPEČNOST PŘI PRÁCI S LASEROVÝM ZAŘÍZENÍM

Laserové záření vyvolává při interakci s biologickou tkání reakce, které mohou být příčinou buď dočasných, nebo i trvalých změn. Tyto změny představují lehčí, či těžší poranění příslušného orgánu, které může v krajních případech skončit oslepnutím nebo dokonce i smrtí. Mimořádné účinky laserového záření vyplývají z jeho specifických vlastností. Obecnou prvotní příčinou poškození libovolné biologické tkáně, bez ohledu na následný účinek, je absorpce laserového záření. Konkrétní typ a rozsah poškození je závislý především na druhu tkáně a ozařovaného orgánu, nebo také na parametrech laserového záření.



Obrázek 11.1: Bezpečnostní varování laserového záření [30]

Vzhledem k tomu, že součástí leteckých zbraňových systémů mohou být laserové zařízení emitující záření o vysokých výkonech, je nezbytné věnovat problematice laserové bezpečnosti značnou pozornost.

Nebezpečí pro oči – Druh a stupeň poškození zraku laserovým zářením závisí na spektrální absorpci jednotlivých částí oka. Pro schopnost a kvalitu vidění má mimořádný význam sítnice, jejíž poranění může být prakticky neléčitelné.

Nebezpečí pro kůži - Kůže smí být vystavena většímu ozáření než oko. Biologické účinky laserového záření o různých vlnových délkách jsou značně rozmanité. V případě menších dávek ozáření se mohou projevit mírným zčervenáním, při silném ozáření velkými puchýři.

Laser se dle bezpečnosti rozděluje do čtyř základních skupin. Limity pro určení kategorie závisí především na vlnové délce záření posuzovaného zařízení a na čase vyzařování.

- **Třída 1:** Lasery, které jsou bezpečné za provozních podmínek, včetně podmínek sledování svazku pomocí optických přístrojů. Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 4000 nm, které jsou bezpečné za provozních podmínek, ale mohou být nebezpečné, jestli uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje.
- **Třída 2:** Lasery vyzařující záření o vlnové délce od 400 nm do 700 nm. Ochrana zraku za normálních okolností je zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex. Tato reakce může být považována za dostatečnou pro zajištění adekvátní ochrany za provozních podmínek.
- **Třída 2M:** Naopak sledování laseru může být daleko nebezpečnější, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje.
- **Třída 3R:** Sledování laserového záření uvnitř svazku je potenciálně nebezpečné.
- **Třída 3B:** Lasery, u kterých je za normálních okolností nebezpečné, jestliže dojde k přímému ozáření svazkem.
- **Třída 4:** Lasery schopné produkovat nebezpečné difusní odrazy. Mohou způsobit poškození pokožky, nebo dokonce vznik požáru. Jejich používání vyžaduje mimořádnou pozornost [1], [30], [31].

12. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo stručně popsat princip fungování laseru a uvést přehled jeho využití, jak v civilním, tak ve vojenském letectví.

Na úvod této práce popisují objev laseru, základní vlastnosti a dále pak jeho stručný princip, který je založen na stimulované emisi fotonů.

V další kapitole uvádím rozdělení nejpoužívanějších typů laserů. Ty se dělí do několika skupin dle druhu aktivního prostředí, dle způsobu jeho buzení, dle vlnové délky a dle časového režimu provozu.

Dále se zabývám využitím laserů v různých oborech lidské činnosti. Zmiňuji se o jejich využití v průmyslu, medicíně, armádě, výzkumu i každodenním životě.

Podstatnou částí práce je uplatnění laserových technologií v civilním a vojenském letectví.

V civilním letectví se především využívají optické dálkoměry v kombinaci s jinými systémy využívající spolehlivější technologie. V posledních letech se zdokonaluje systém laserového skenování terénu pomocí lidarů, umožňující sběr bodů pro tvorbu digitálního modelu reliéfu terénu.

Ze všech dostupných zdrojů, ze kterých jsem čerpal, jsem došel k závěru, že laserové systémy jsou nejvíce využívány především pro vojenské účely. Konkrétně se jedná o dálkoměry, palubní systémy výstrahy, detektory cíle pro řízené střely, naváděcí systémy a laserové zbraně.

Světové mocnosti investují ohromné částky do vývoje a testování stále modernějších a výkonnějších laserových zbraní, jejichž detaily jsou přísně utajovány.

Do budoucna se pole působnosti laserů bude s největší pravděpodobností nadále rozšiřovat. Lasery budou výkonnější, přesnější a jejich energie se bude využívat v mnoha dalších odvětvích. Laser bude i nadále velkým pomocníkem v oblasti výzkumu.

13. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUKÁŠ, Kachtík. Lasery. *Lasery*. [online]. 26.3.2013 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/>.
- [2] Laser. *Wikipedie*. [online]. 23.9.2015 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [3] Is there a limit to lasers. *Science Blogs*. [online]. 2.5.2014 [cit. 2016-04-8]. Dostupné z: <http://scienceblogs.com/startswithabang/2014/05/02/ask-ethan-35-is-there-a-limit-to-lasers-synopsis/>
- [4] Zelené a UV lasery. *Mega-Blog*. [online]. 23.3.2012 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [5] Elektromagnetické spektrum. *Wikipedie*. [online]. 10.2.2016 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagneticke_spektrum
- [6] Co je to laser. *4 oci*. [online]. 2.2.2005 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.4oci.cz/co-je-to-laser_4c382
- [7] Co je vlastně laser. *Hilase*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://czechlasers.cz/co-je-vlastne-laser/>
- [8] Remembering Laser Theory Pioneer Charles Townes. *The Institute*. [online]. 30.1.2015 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://theinstitute.ieee.org/ieee-roundup/opinions/ieee-roundup/remembering-laser-theory-pioneer-charles-townes->
- [9] Typy laseru. *Wikiskripta*. [online]. 9.3.2015 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Typy_laseru
- [10] DPSS Laser. *Photonic Solutions*. [online]. 14.4.2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://217.199.187.193/photonicssolutions.co.uk/product-detail.php?prod=6102>
- [11] Laser. *Wikiskripta*. [online]. 29.5.2015 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Laser>
- [12] Plus. *Rozhlas*. [online]. 16.11.2009 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/657865
- [13] KUSALA, Jaroslav. Typy laseru. *Čez*. [online]. 2004 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [14] KUSALA, Jaroslav. Aplikace laseru. *Čez*. [online]. 2004 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm>

- [15] BEDNÁŘ, Marek. Autoforum. *Autoforum*. [online]. 11.3.2016 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zajimavosti/laserovy-odstranovac-rzi-je-uzasne-efektivni-zni-jako-svetelny-mec/>
- [16] Laser a laserové technologie. *Zones*. [online]. 19.1.2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.zones.sk/studentske-prace/fyzika/7879-laser-a-laserove-technologie/>
- [17] Laserové aplikace. *Hilase*. [online]. 2015 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://czechlasers.cz/laserove-aplikace/>
- [18] Akela Laser. *Akela Laser*. [online]. 2016 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.akelalaser.com/markets/medical/>
- [19] JELINKOVA, Helena. Aplikace laseru. *Vega CVUT*. [online]. 2002 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/>
- [20] Four Lasers Over Paranal. *Eso*. [online]. 27.4.2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.eso.org/public/news/eso1613/>
- [21] Directed Energy. *Boeing*. [online]. 2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.boeing.com/defense/missile-defense/directed-energy/>
- [22] ARMY.MIL. *ARMY.MIL*. [online]. 2.6.2010 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: https://www.army.mil/article/40214/Army_testing_green_laser_kits_in_Afghanistan/
- [23] GROHMANN, Jan. Námořní technika. *Armádní noviny*. [online]. 11.9.2011 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/laserove-zbrane-nastupuji-k-namornictvu.html>
- [24] GROHMANN, Jan. Vojenská výzbroj. *Armádní noviny*. [online]. 22.11.2011 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/glef-obranny-zeleny-laser-chrani-zivoty.html>
- [25] GROHMANN, Jan. Vojenská výzbroj. *Armádní noviny*. [online]. 24.11.2011 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/uspesny-test-protileteckeho-laseru-ve-svycarsku.html>
- [26] How laser printers work. *How stuff works*. [online]. 2015 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://computer.howstuffworks.com/laser-printer7.htm>
- [27] PALS. *PALS*. [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.pals.cas.cz/>
- [28] Plus. *Rozhlas*. [online]. 8.2.2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.rozhlas.cz/leonardo/magazinleonardo/_zprava/nejsilnejsi-laser-sveta-je-v-cesku-a-jmenuje-se-krakatit-1582159

- [29] Lasery a optika. *Lao*. [online]. 19.2.2013 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery—zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [30] Laser safety. *Wikipedia*. [online]. 4.5.2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety
- [31] NĚMEČEK, Jiří a Petr BOJDA. 2004. *Optoelektronická a radiotechnická zařízení v systémech výzbroje letadel: Vybrané kapitoly teorie laserových systémů*. 3. Brno: VA Brno.
- [32] NĚMEČEK, Jiří. 2002. *Optoelektronická a radiotechnická zařízení v systémech výzbroje letadel: Vybrané kapitoly optoelektronických koordinátorů řízené munice*. 2. Brno: VA Brno.
- [33] NĚMEČEK, Jiří, Petr BOJDA a Pavel GRECMAN. 2007. *Základy rádiové a optické lokace*. Brno: Univerzita obrany. ISBN 978-80-7231-205-4.
- [34] Laser. *Světlo*. [online]. 2004 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/laser-co-to-je-a-jak-se-to-stalo-1-cast-16517>
- [35] DOLANSKY, Tomas. Lidary. *PF JCU*. [online]. 2004 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf>
- [36] GROHMANN, Jan. Vojenská výzbroj. *Armádní noviny*. [online]. 26.9.2014 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/laserova-strelecka-vez-pro-bojova-letadla.html>
- [37] GROHMANN, Jan. Vojenská výzbroj. *Armádní noviny*. [online]. 22.5.2015 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/rok-2022-laserove-zbrane-na-stihackach.html>
- [38] GROHMANN, Jan. Letecká technika. *Armádní noviny*. [online]. 16.11.2015 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/testy-leteckych-laseru-velke-nadeje-a-problemy-s-turbulenci.html>
- [39] Aviation Week. *Aviation Week*. [online]. 24.1.2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://aviationweek.com/blog/navy-test-fire-darpas-hellads-laser>

14. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

λ	[m] [nm]	vlnová délka
E	[J]	energie
h	[J.s]	Planckova konstanta
ν	[Hz]	frekvence
t	[°C]	teplota
P	[W] [kW]	výkon
LASER	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation	
MASER	M icrowawe A mplification by S timulated E mission of R adiation	
LIDAR	L ight D etection A nd R anging	
FEL	F ree E lectron L aser	
PALS	P rague A sterix L aser S ystem	

15. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1: Lasery různých barev	9
Obr. 3.2: Spektrum viditelného světla	9
Obr. 4.1: Townes demonstrující svůj maser	10
Obr. 5.1: Laserové paprsky různých barev	10
Obr. 6.1: Součásti laseru	11
Obr. 6.2: Interakce fotonu a elektronu	12
Obr. 6.3: Stimulovaná emise záření	12
Obr. 6.4: Princip laseru	12
Obr. 7.1: Pevnolátkový laser Nd-YAG	13
Obr. 7.2: Helium-Neonový laser	13
Obr. 7.3: UV Laser	14
Obr. 7.4: Stanford Linear Accelerator Center	14
Obr. 8.1: Laser pro průmyslové aplikace	15
Obr. 8.2: Lasersystem CL 1000	16
Obr. 8.3: AKELA Laser	16

Obr. 8.4: Laserová operace očí.....	16
Obr. 8.5: Schematické znázornění měření vzdálenosti umělých družic Země.....	17
Obr. 8.6: Four Laser Guide Star Facility	17
Obr. 8.7: HEL MD (High Energy Laser, Mobile Demonstrator)	18
Obr. 8.8: GLEF (Green Light Escalation of Force) system.....	18
Obr. 8.9: Princip laserové tiskárny	19
Obr. 8.10: Prague Asterix Laser System	19
Obr. 10.1: Principiální blokové schéma laserového dálkoměru	21
Obr. 10.2: Obecný systém laserové lokace.....	22
Obr. 10.3: Měření odchylky cíle.....	22
Obr. 10.4: Testování laserové střelecké věže ABC na malém obchodním letadle.....	23
Obr. 10.5: Kapalinou chlazený pevnolátkový vysokoenergetický laserový systém	24
Obr. 11.1: Bezpečnostní varování laserového záření	25