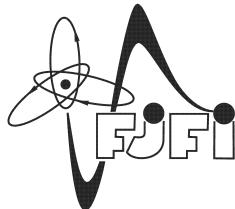


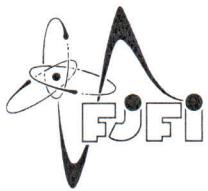
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
Katedra fyzikální elektroniky



Vysílač pro laserový dálkoměr  
Laser transmitter for miniature  
rangefinder

Bakalářská práce

Autor práce: **Jakub Kákona**  
Školitel: **Prof. Ing. Ivan Procházka, DrSc.**  
Konzultanti: **Prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.**  
**Doc. Ing. Václav Kubeček, DrSc.**  
Školní rok: **2011/2012**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ**  
*Katedra fyzikální elektroniky*

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

*Student:* **Jakub Kákon a**

*Obor:* **Fyzikální inženýrství**

*Zaměření:* **Laserová technika a optoelektronika**

*Školní rok:* **2011/2012**

*Téma úkolu:* **Laserový vysílač pro miniaturní dálkoměr**  
**Laser transmitter for miniature rangefinder**

*Ved. úkolu:* **prof. Ing. Ivan Procházka, DrSc.**

*Konzultant:*

*Pokyny pro vypracování:*

1. Seznamte se s koncepcí a základními konstrukčními parametry miniaturního laserového dálkoměru.
2. Seznamte se s principem činnosti a konstrukcí diodově čerpaného pevnolátkového laseru, užívaného jako laserové ukazovátko.
3. Navrhněte a otestujte elektronický budící obvod pro takový laser pro generaci krátkých laserových pulsů.
4. Optimalizujte tento obvod společně s výběrem typu laseru pro dosažení minimální délky pulsu na vlnové délce 532 nm.

*Literatura:*

1. Range Finding Using Pulse Lasers - Application Note, OSRAM opto semiconductors, 10.8.2004
2. A. Kilpelä, Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast,high precision measurement applications, University of Oulu, Finland, 2004,  
<http://herkules.oulu.fi/isbn9514272625/isbn9514272625.pdf>
3. SHORT PULSE LASER DIODE DRIVER - datasheet, Omipulse, 24.5.2011
4. Near-Infrared Laser Range Finder, using kHz Repetition Rate  
J.Kölbl, M. Fröschla, A. Seedsmana, P. Sperber, SPIE 7115-21, 22.9.2008
5. Micro-Laser Range Finder Development: Using the Monolithic Approach  
, John Nettleton, Dallas Barr, Brad Schilling & Jonathan Lei US ARMY CECOM RDEC NVESD, Fort Belvoir, VA, February 1999.

Datum zadání: říjen 2011

Datum odevzdání: 9.červenec 2012



Vedoucí katedry



Děkan



V Praze 24.10.2011

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi umožnili realizovat tuto práci. Zvláště pak Ing. Josefu Blažeji, Ph.D. dále školiteli Prof. Ing. Ivanu Procházkovi, DrSc. A také mým rodičům a přátelům za inspiraci a trpělivost.

Konstrukce prototypů laserového vysílače byla realizována z prostředků firmy Universal Scientific Technologies s.r.o.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

Praha, 9.7.2012

Jakub Kákona

## **Abstrakt**

Práce se zabývá prověřením možnosti použití diodově čerpaného pevnoplátkového laserového modulu generujícího výstupní záření na vlnové délce 532nm jako laserového vysílače vhodného pro miniaturní laserový dálkoměr. Tyto laserové moduly jsou běžně používány v zelených laserových ukazovátkách, proto jsou velmi dobře dostupné na rozdíl od polovodičových laserových diod pro tyto vlnové délky. Byl proto navržen pulzní budič pro tyto laserové moduly s parametry vhodnými pro využití v laserovém dálkoměru.

**Klíčová slova:** DPSSFD, laserový vysílač, laserový dálkoměr, zelené ukazovátko, 532nm, ceilometr.

## **Abstract**

This thesis is aimed on investigation of use a diode pumped solid state frequency doubled laser module (with 532nm output wavelength) as LASER transmitter for miniature laser range finder. This module is widely used in green laser pointers. For that reason it is easily available in opposition to semiconductor laser diodes for this wavelengths.

**Keywords:** DPSS module, green laser pointer, laser range finder, miniature laser rangefinder construction, laser diode pulser circuit, Laser Ceilometer.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
1.1 Principy měření vzdálenosti . . . . .	2
1.1.1 Triangulační metoda . . . . .	2
1.1.2 Fázová metoda . . . . .	3
1.1.3 Měření doby šíření (ToF) . . . . .	3
1.2 Požadavky na pulsní laserový vysílač . . . . .	6
1.2.1 Vlnová délka záření . . . . .	6
1.2.2 Délka výstupního světelného impulzu . . . . .	7
1.2.3 Energie impulzu . . . . .	8
1.2.4 Divergence a parametry svazku ve vzdálené zóně . . . . .	8
1.2.5 Nejistota spouštění (Trigger jitter) . . . . .	9
<b>2 Rozbor problému</b>	<b>10</b>
2.1 Druhy modulovatelných laserů . . . . .	10
2.1.1 Polovodičový diodový LASER . . . . .	10
2.1.2 Pevnolátkové lasery . . . . .	10
2.1.3 Pevnolátkový diodově čerpaný LASER s generací druhé harmonické	11
2.2 Metody generace krátkých impulzů . . . . .	11
2.2.1 Volně běžící pulzní režim (PCW) . . . . .	11
2.2.2 Q spínání . . . . .	11
2.2.3 Synchronizace módů (Mode-locking) . . . . .	11
2.2.4 Spínání ziskem (gain switching) . . . . .	12
2.3 Fyzikální model laserového vysílače . . . . .	12
2.3.1 Rychlostní rovnice . . . . .	12
2.3.2 Relaxační kmity pevnolátkových laserů . . . . .	13
2.3.3 Spínání impulzu ziskem . . . . .	14
2.3.4 Generace druhé harmonické	14
2.4 Dosavadní řešení problému . . . . .	15
2.4.1 Jiné ToF dálkoměry . . . . .	16
<b>3 Řešení</b>	<b>17</b>
3.1 Konstrukce DPSSFD modulu . . . . .	17
3.1.1 Čerpací dioda . . . . .	18
3.1.2 Aktivní prostření a konverzní krystal . . . . .	18
3.1.3 Kolimace výstupního svazku a výstupní IR filtr . . . . .	19

3.1.4	Původní regulační obvod . . . . .	20
3.2	Parametry laserových modulů . . . . .	21
3.2.1	Běžné provozní hodnoty . . . . .	21
3.2.2	Rozdíly mezi laserovými moduly . . . . .	23
3.3	Měření krátkých světelných impulzů . . . . .	23
3.4	Relaxační kmity DPSSFD modulu . . . . .	24
3.5	Vlastní řídící elektronika . . . . .	26
3.5.1	Stabilizovaný zdroj proudu . . . . .	27
3.5.2	Pulzní budič laserové diody . . . . .	27
3.6	Diskuse dosažených výsledků . . . . .	32
3.6.1	Dosažené parametry vysílače . . . . .	32
3.6.2	Možnosti dalšího vývoje . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>34</b>
<b>Literatura</b>		<b>36</b>
<b>A</b>	<b>Slovník</b>	<b>37</b>
<b>B</b>	<b>Schéma pulzního budiče</b>	<b>39</b>
<b>C</b>	<b>Plošný spoj navrženého pulzního budiče</b>	<b>41</b>
<b>D</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>48</b>

# Seznam obrázků

1.1	Zjednodušené blokové schéma ToF LRF [1] . . . . .	4
1.2	Závislost transmisivity čisté atmosféry na vlnové délce záření [2] . . . . .	6
1.3	Běžná závislost reflektance vodních oblaků v atmosféře. Barevnými křivkami je pak znázorněna reflektance sněhu. . . . .	7
1.4	Zobrazení nejistoty spouštění laseru - modrá křivka znázorňuje čerpání a červená křivka je měřená intenzita výstupního impulzu složená z několika výstřelů laseru. . . . .	9
3.1	Typická konstrukce diodově čerpaného pevnolátkového laseru používaného jako zelené laserové ukazovátko. [3] . . . . .	17
3.2	Výstupní výkon typického Nd:YVO <sub>4</sub> laseru v závislosti na teplotě diody a vlnové délce [4]. . . . .	19
3.3	Promítané stopy svazků ve vzdálenosti 20m od modulu. Vlevo modul 5mW, napravo varianta 20mW. Měřítko vpravo dole má rozměr 0,5mrad.	20
3.4	Měření prováděné s původním regulačním obvodem. . . . .	21
3.5	Použité testovací DPSSFD moduly 5mW (vlevo)[5] a 20mW (vpravo) [6].	22
3.6	Schéma detektoru s PIN diodou. . . . .	23
3.7	Realizovaný detektor časového průběhu záření. . . . .	24
3.8	Závislost intenzity výstupního záření na proudu čerpací diodou. . . . .	25
3.9	Časové průběhy výstupních impulzů laseru pro 20mW modul (typ s větší výstupní hlavou M10) s vhodně nastaveným pracovním bodem. . . . .	26
3.10	Průběh výstupních impulzů v případě použití 5mW verze modulu (typ s menší výstupní hlavou M8). . . . .	27
3.11	Aparatura použitá pro měření intenzity optického výstupu v závislosti na budícím proudu. . . . .	28
3.12	Koncepce použití navrženého pulzního budiče. . . . .	29
3.13	Návrh plošného spoje pulsního budiče LDD01A . . . . .	31
3.14	Běžné konfigurace vnitřního zapojení polovodičových laserů [7] . . . . .	31

# Zadání

Cílem práce je prověřit možnost použití diodově čerpaného pevnolátkového laserového modulu v aplikaci laserového vysílače vhodného pro **Time of flight (ToF)** měření vzdálenosti (výšky oblačnosti). Práce bude realizována v několika krocích:

- Změření skutečných parametrů laserových modulů.
- Návrh metody použití laserového modulu.
- Konstrukce řídící elektroniky pro modulátor laserového vysílače.
- Změření dosažených parametrů.

V prvním kroku bude rozebrána konstrukce laserového modulu a ověřen princip jeho činnosti společně s rozborem průměrných parametrů modulů. Po změření parametrů laserů bude možné rozhodnout o vhodnosti a konkrétním způsobu použití laserového modulu v laserovém dálkoměru. Následně je nutné zkonztruovat vhodný řídící obvod čerpací diody modulu tak, aby bylo možné modul využít pro zvolenou aplikaci.

Cílem použití zde konstruovaného laserového vysílače je měření výšky základny oblačnosti, respektive měření výškového profilu hustoty kondenzující vody v atmosféře. Takto získané údaje mají být využity jako vstupní data řídícího systému automatického robotického teleskopu určeného pro astronomická pozorování. Primárním cílem využití těchto dat je zabezpečení systému dalekohledu před poškozením sněhem/deštěm. V některých oblastech nasazení takto automatizovaných dalekohledů mohou být také problémem prachové bouře (Chile, Austrálie, Sahara) nebo extrémní teploty (Sibiř, Afrika).

Vzhledem k těmto faktům, kdy se jedná převážně o pozemní jevy odehrávající se ve výškách menších než cca 1km nad povrchem, tak není potřebné aby laserový vysílač umožňoval měření na delší vzdálenosti. Zároveň se od měřiče neočekávají data během denní doby, protože pozemní astronomická pozorování se zatím provádějí převážně během noci.

# Kapitola 1

## Úvod

Laserový dálkoměr je zařízení, které je schopno měřit vzdálenost objektu odrážejícího záření optických vlnových délek. Tyto objekty mohou být různého charakteru a dálkoměr je pak v principu schopen měřit pevné, kapalné nebo plynné struktury, případně i jejich kombinace.

Možnosti jeho aplikace jsou proto velmi rozsáhlé od zaměřování a mapování topografie terénu přes vytváření přesných tvarových modelů malých předmětů až po jeho použití v meteorologii, nebo pro vojenské aplikace.

### 1.1 Principy měření vzdálenosti

Základním principem laserových dálkoměrů je měření určité vlastnosti signálu odraženého od předmětu vůči známým parametrům signálu vyzářeného vysílačem. Existuje k tomu několik používaných metod.

- Měření geometrického posunu stopy laseru na předmětu
- Měření fázového posunu přijímaného a vysílaného signálu
- Měření časového zpoždění vyslaného a zpětně rozptýleného fotonu **ToF**.

#### 1.1.1 Triangulační metoda

Tato metoda měření je založena na geometrické vlastnosti světelného paprsku - světlo se v homogenním prostředí šíří přímočaře. Použijeme-li tedy zdroj světla, který vydává málo rozbíhavý světelný paprsek **LASER** a pod určitým úhlem vůči ose pozorovatele jej budeme promítat na předmět, pozorovatel bude mít světelnou stopu v různých bodech zorného pole podle vzdálenosti pozorovaného předmětu.

Metoda je konstrukčně velice snadná, a proto existuje mnoho realizací od amatérských konstrukcí až po profesionální výrobky. Obvykle jsou tímto způsobem řešeny 3D skenery malých předmětů, jako jsou historické vázy, sochy, nebo jiná umělecká díla, která je vhodné tvarově zdokumentovat. Skener pak pro urychlení procesu nepoužívá pouze jeden světelný bod, který laser obvykle produkuje, ale je použita cylindrická čočka, která svazek rozšíří do roviny ve směru řezu předmětu (laser-sheet). V tomto

uspořádání pak pro kompletní 3D obraz objektu stačí s laserem, nebo promítacím zrcátkem hýbat pouze v jedné ose.

Ke snímání obrazu je v tomto případě obvykle využíván maticový snímač - **CCD** nebo **CMOS** sensor. Tato metoda funguje pouze v rozsahu vzdáleností daných úhlem, ve kterém se laser na předmět promítá, a také úhlovou velikostí zorného pole snímače. Z praktických důvodů a požadavků na přesnost měření je tato metoda využívána pouze v rozsahu několika centimetrů až metrů.

### 1.1.2 Fázová metoda

U této metody je vyžívána samotná vlastnost světla, že se prostorem šíří pouze omezenou rychlostí. Při měření vysílač vysílá určitým způsobem periodicky modulovaný signál, který se odráží od předmětu a dopadá na intenzitní detektor, který umožňuje jeho časovou korelací s modulovaným odchozím signálem.

Výsledkem měření je tedy fázové zpoždění odpovídající určité vzdálenosti. Očekávaným problémem této metody ovšem je fakt, že způsob modulace přímo ovlivňuje měřený rozsah, tj. měření vzdálenosti je možné pouze v rozsahu jedné periody modulace. Vzhledem k tomu, že měřená vzdálenost není obvykle dopředu známa, je potřeba, aby vysílač umožňoval mnoho způsobů modulace vysílaného svazku. Další komplikací je pak požadavek na dobrou odrazivost měřeného předmětu, protože fázový detektor potřebuje ke své správné funkci dostatečný odstup signálu od šumu. Metoda se proto obvykle využívá pro měření vzdáleností v malém rozsahu (řádově desítky metrů a méně). Typickým příkladem využití této měřící metody jsou kapesní stavební dálkoměry, používané jako nahradu klasických svinovacích metrů.

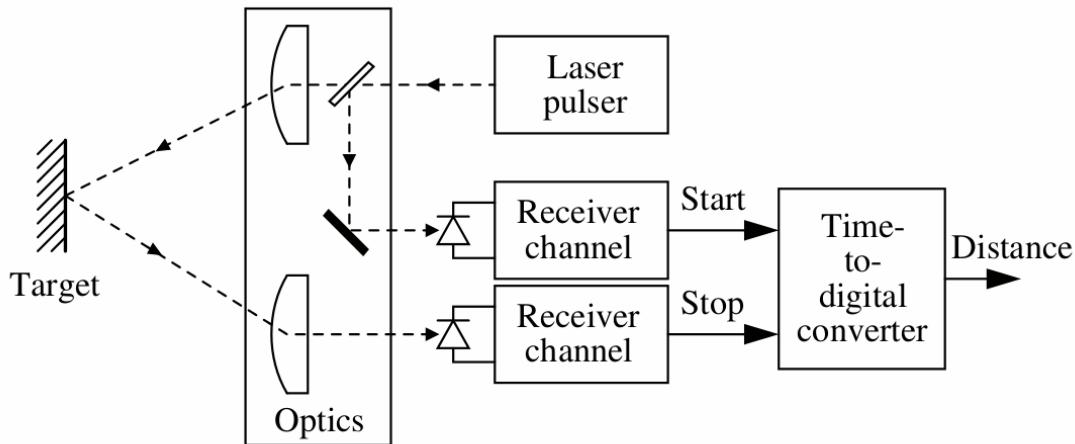
Další variací fázové metody je využití přímo vlnové struktury světla. Vysílaný i odražený svazek v tomto případě nechat interferovat na maticovém snímači. Výsledná interference je pak velmi citlivá na vzájemný fázový posun obou svazků ve zlomcích vlnové délky. Tím lze dosáhnout velkého prostorového rozlišení ve smyslu měření změn vzdálenosti až na atomární úroveň (desítky až jednotky nanometrů). Tento princip je pak využíván ve specializovaných aplikacích, jako jsou velmi přesné obráběcí automaty, **AFM** mikroskop, detektory gravitačních vln nebo špiónážní zařízení měřící zvukem vybuzené vibrace okenních výplní.

### 1.1.3 Měření doby šíření (ToF)

Další metodou, kterou můžeme využít pro měření vzdálenosti na základě známé a konečné rychlosti šíření světla, je změření doby šíření určitého balíku fotonů, který je vygenerován vysílačem a následně po odrazu od měřeného objektu detekován v detektoru. Naměřená doba šíření pak odpovídá dvojnásobku vzdálenosti mezi vysílačem a měřeným předmětem

$$d = \frac{ct}{2n}, \quad (1.1)$$

kde  $c$  je rychlosť šíření elektromagnetického záření ve vakuu,  $n$  je index lomu prostředí (pro atmosférická měření  $n \approx 1$ ) a  $t$  je změřená doba šíření. Veličina  $d$  je pak



Obrázek 1.1: Zjednodušené blokové schéma ToF LRF [1]

vzdálenost předmětu.

Při měření se předpokládá homogenní prostředí, ve kterém se světlo šíří, nebo alespoň prostředí o určité známé efektivní hodnotě indexu lomu. Pokud dále předpokládáme šíření bez rozptylu a absorpcie s tím, že celý laserový signál zasáhne kompaktní měřený objekt, může být počet zpětně rozptylených a zároveň detekovaných fotonů přibližně vyjádřen vztahem (1.2).

$$N \approx E\eta \frac{1}{R^2}r \quad (1.2)$$

Kde

$N$  - počet detekovaných fotonelektronů.

$E$  - energie ve vyslaném laserovém pulzu (počet fotonů).

$\eta$  - koeficient celkové optické účinnosti přístroje.

$R$  - vzdálenost cíle.

$r$  - označuje efektivní odrazivost cíle.

Vzhledem k tomu, že pro větší vzdálenosti je pravděpodobnost zachycení zpětně odraženého fotonu malá, jsou využívány různé techniky pro zlepšení poměru S/N. Často jde o metody pokročilého signálového zpracování jako například lock-in měření.

Tato metoda má vzhledem k předchozím podstatnou výhodou především v tom, že její princip umožňuje změřit vzdálenosti v obrovském rozsahu a přitom neklade vysoké nároky na odstup měřeného signálu od šumu. Běžně se proto využívá například pro měření a následné výpočty korekcí drah družic nebo měření podélných parametrů optických komunikačních vláken, kde je metoda známa, jako TDR. Možnosti aplikace

metody měření doby šíření jsou tak rozsáhlé, že je využívána i v mnoha dalších přístrojích jako radiolokátory nebo echolokátory.

V principu existují dvě možné varianty implementace **ToF** metody měření vzdálenosti, které se liší způsobem zpracování signálu. První je měření časového průběhu intenzity odraženého signálu z prostředí před vysílačem. Využívá se při tom rychlý intenzitní detektor a vzorkovací obvod, který v intervalech odpovídajících časovému rozlišení přístroje periodicky vzorkuje signál z detektora. Velkou výhodou tohoto přístupu je, že i z jediného výstřelu laseru je možné získat poměrně značné množství informací. Problémem je ale požadavek na velký špičkový výstupní výkon laseru (řádově stovky Wattů), který může značně snížit bezpečnost provozu zařízení. Nezanedbatelné jsou zároveň také požadavky na velkou vstupní aperturu detekčního teleskopu, která je obvykle řádově desítky cm.

Používá se proto i méně náročná implementace, která využívá kvantovou povahu světla, a kde jsou snímačem detekovány pouze jednotlivé odražené fotony, což umožňuje podstatně snížit nároky na špičkový výstupní výkon i na sběrnou plochu detektora. Nevýhodou je ale nutnost opakovat mnoho měření k získání několika tisíc až stovek tisíc hodnot, které je pak možné statisticky zpracovat. Podstatnou výhodou této metody ale je fakt, že je možné ji aplikovat i na extrémní vzdálenosti, kde i původní vícefotonová implementace již z principiálních důvodů selhává (respektive konverguje k této jednofotonové variantě) [8]. Tato práce je proto zaměřena právě na tento jednofotonový princip měření.

Pro konstrukci laserového systému vhodného pro **ToF Laser rangefinder (LRF)**, je potřeba několik dílčích součástí znázorněných v blokovém schématu 1.1. Význam jednotlivých částí v blokovém schématu je následující.

**Target** - předmět jehož vzdálenost měříme. V našem případě to bude základna oblačnosti. (tzn. vodní kapky mikroskopických rozměrů).

**Optics** - Vstupní a výstupní optická část, obvykle realizována některou z konstrukcí optického teleskopu (Kepler, Newton). Důležitá je kvůli vymezení divergence vystupujícího svazku a omezení **field of view (FOV)** detektora. Její další úlohou je také ochrana vnitřních částí přístroje před vnějším prostředím. Proto musí mít vnější optická plocha často speciální konstrukci.

**Laser pulser** - Zdroj měřícího impulzu splňující požadavky popsané v následující sekci 1.2.

**Receiver channel** - Detektor selektivně citlivý na vlnovou délku vysílaného záření. Může být realizován PIN diodou, nebo v případě jednofotonového měření **Avalanche photodiode (APD)** detektorem.

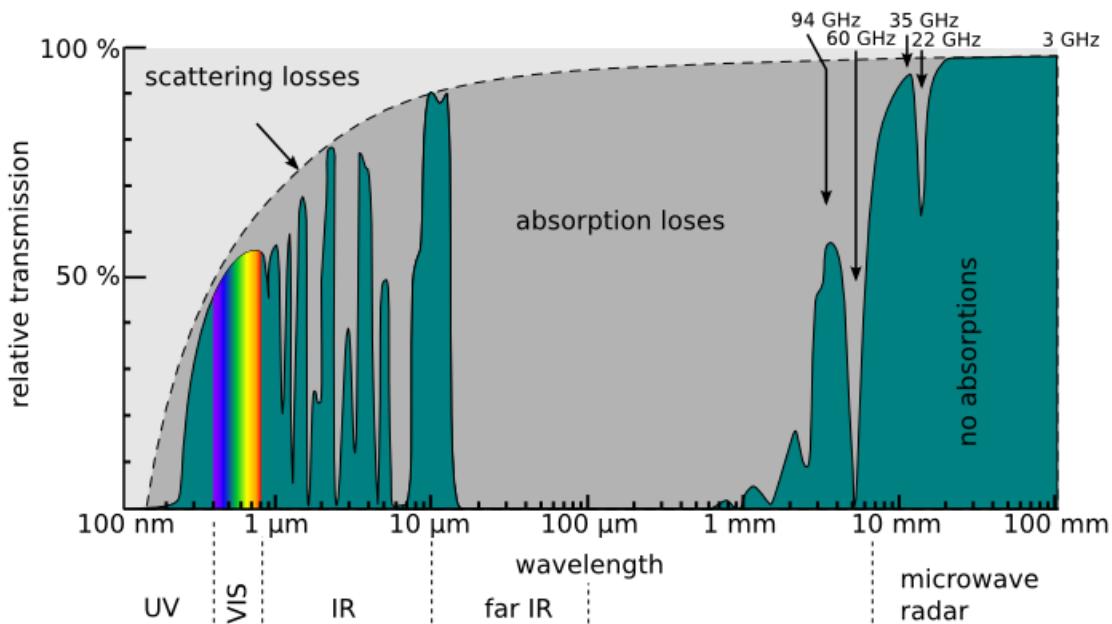
**Time to digital converter** - Elektronický obvod umožňující přesné měření časového intervalu. Jeho přesnost vedle délky vyslaného laserového impulzu rozhoduje o výsledném rozlišení přístroje. V principu jede o digitální čítač. Pro přesné měření jsou ale využívány speciální **TDC** integrované obvody. Jeho výstupem je číselná hodnota odpovídající délce časového intervalu.

## 1.2 Požadavky na pulsní laserový vysílač

Protože laserový vysílač může mít různé specifické parametry podle účelu jeho použití, týká se následující kapitola parametrů vysílače určeného k měření oblačnosti.

### 1.2.1 Vlnová délka záření

Vhodná vlnová délka výstupního záření laserového vysílače záleží na mnoha faktorech, jako je například absorpcie v médiu vyplňujícím prostor mezi vysílačem a detekovaným předmětem, nebo i spektrální odrazivost měřeného objektu. Pro uvažovanou modelovou aplikaci měření výšky a mohutnosti oblačnosti jsou vhodné krátké vlnové délky z optického oboru elektromagnetického záření. Je to dán vlastnostmi atmosféry, která dobře propouští vlnové délky z oblasti viditelného spektra. Viz. obr. 1.2.



Obrázek 1.2: Závislost transmisivity čisté atmosféry na vlnové délce záření [2]

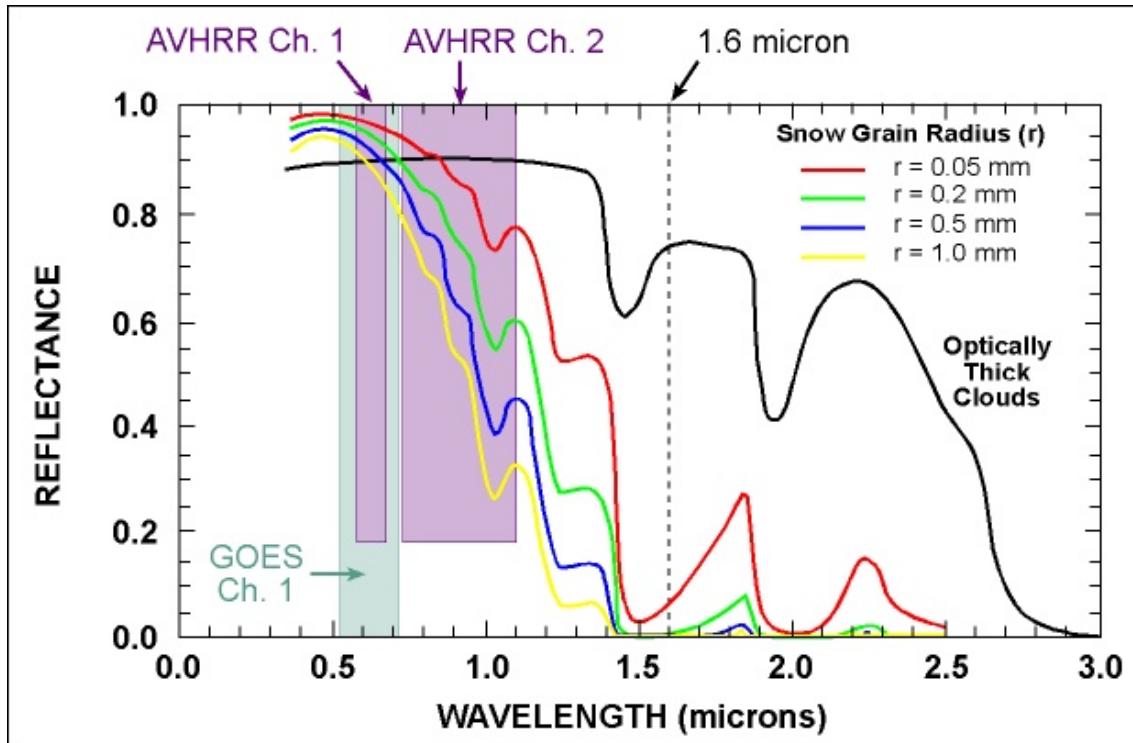
Vzhledem k tomu, že na krátkých vlnových délkách směrem k **UV** oblasti strmě stoupá vliv nežádoucího Rayleighova rozptylu (rovnice 1.3), který omezuje použitelný dosah měření, je vhodné použít střední vlnovou délku optického záření ze zelené oblasti spektra. Která relativně dobře prochází čistou atmosférou.

$$\kappa_R(\lambda) = K \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.3)$$

$\kappa_R(\lambda)$  - extinkční koeficient Rayleighova rozptylu.

$K$  - parametr závisející na typech plynů v prostředí a jejich parciálních tlacích.

Pro měření oblačnosti (vodních a nebo prachových částic) je však podstatný Mieův rozptyl (Mie scattering), ke kterému dochází na částicích, které jsou srovnatelné s vlnovou délkou záření. Tento rozptyl má složitější závislost na vlnové délce než Rayleighův díky vlivu geometrie částic. Naměřená závislost ze zdroje [9] je uvedena na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Běžná závislost reflektance vodních oblaků v atmosféře. Barevnými křivkami je pak znázorněna reflektance sněhu.

### 1.2.2 Délka výstupního světelného impulzu

V případě, že nás zajímá metoda založená na měření doby šíření, budeme od laserového vysílače také požadovat, aby umožňoval generovat krátké časové impulzy, což je důležité kvůli lepšímu časovému rozlišení při měření a následnému lepšímu prostorovému rozlišení při měření vzdálenosti. Je to dáno tím, že v impulzu je obvykle vysláno velké množství fotonů, ale zpátky v detektoru je detekován pouze jeden. V případě dlouhého impulzu tedy pak nejsme schopni určit, z které části impulzu nám detekovaný foton přišel.

Pro případ měření výšky základny oblačnosti, která sama o sobě nemá příliš strmý přechod, je zbytečné měřit s přesností vyšší, než řádově metry. Proto stačí od laserového vysílače požadovat délky pulzů kratší, než stovky nanosekund.

### 1.2.3 Energie impulzu

Energie výstupního impulzu by měla být ideálně co největší, aby bylo dosaženo vysoké pravděpodobnosti zachycení některého zpětně odraženého fotonu v každém měření. Zároveň je však třeba brát ohled i na bezpečnostní rizika laserového systému a držet se bezpečných úrovní pro intenzity elektromagnetického záření, které předepisuje norma IEC/EN 60825-1, která pro vlnovou délku 532nm a impulz délky 100ns specifikuje pro člověka bezpečnou hodnotu **maximum permissible exposure (MPE)** jako  $0,75\text{uJ/cm}^2$ . Laserové zařízení splňující tento požadavek za všech okolností je pak považováno za bezpečné a označováno třídou bezpečnosti 1. Pokud tento požadavek nemůže být splněn za všech okolností (například díky použití nějaké externí kolimační optiky), je zařízení deklarováno jako 1M.

Zvláštním případem je provoz laserových zařízení ve venkovním prostředí, kdy může docházet k interakci s letovým provozem. Zde zatím neexistuje konzistentní opatření, které by definovalo bezpečnost provozu [10]. Podle doporučení U.S. FAA by však v běžném letovém prostoru<sup>1</sup> neměla intenzita záření přesáhnout  $2,5\text{mW/cm}^2$ .

Vysílač tedy musí být konstruován tak, aby výstupní svazek (který bude v případě využití jako ceilometru směrovat svisle do atmosféry) měl dostatečně malou hustotu energie, aby nebyla nebezpečná pro letecký provoz a ideálně ani pro případné živočichy pohybující se nad laserovým měřičem.

### 1.2.4 Divergence a parametry svazku ve vzdálené zóně

Během generování balíku fotonů laserovým vysílačem mají na prostorové rozložení energie v pulzu vliv různé asymetrie laserové dutiny, rezonátoru a apertury. Důsledkem obvykle je jiný než gaussovský příčný profil svazku a vlivem konečného rozměru výstupní apertury i jeho nenulová rozvíhavost. Vzhledem k tomu, že svazek je takto modifikován primárně difrakčními jevy, je smysluplné zkoumat profil svazku hlavně ve vzdálené zóně. Existuje však difrakční limit minimální divergence svazku na apertuře konečného průměru, který lze vyjádřit vztahem 1.4.

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad (1.4)$$

$\theta$  - divergence svazku (plný úhel)

$\lambda$  - vlnová délka záření

$w_0$  - poloměr nejužšího místa svazku

Pro laserový vysílač používaný k měření oblačnosti je však podstatné, že pokud předpokládáme velikost oblaku minimálně stejnou, jako průměr svazku v dané výšce, není počet odražených fotonů závislý na divergenci svazku výstupního záření (platí vztah 1.2). Větší divergence svazku však vyžaduje stejný FOV na teleskopu přijímače, což komplikuje dosažení dobrého poměru S/N.

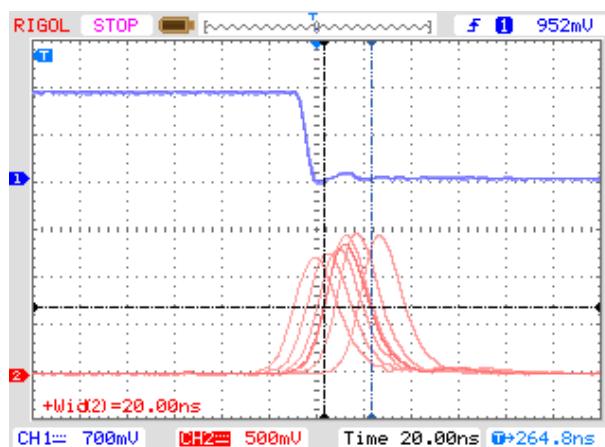
---

<sup>1</sup>Dále než 18,5km od letiště a výše než 3000m nad povrchem.

### 1.2.5 Nejistota spouštění (Trigger jitter)

Nejistota spouštění je časový parametr, který určuje velikost intervalu, během kterého může po náhodném čase od sepnutí laseru dojít k vygenerování světelného impulzu. Skutečnost, že tato doba není striktně konstantní, je dána mimo jiné například tím, že v laserovém oscilátoru vzniká stimulovaný světelný impulz na základě prvního uvolněného spontánního fotonu, k jehož uvolnění dochází v náhodném čase.

Pro jednoduchost konstrukce laserového vysílače je výhodné, když laser generuje impulsy se známým zpožděním, neboť pak není nutné měřit přesnou dobu, kdy vygenerovaný balík fotonů ve skutečnosti opustil vysílač. (Toto chování je ilustrováno na obrázku 1.4.) Vzhledem k plánovanému využití vysílače je asi rozumné požadovat, aby jitter spouštění byl maximálně srovnatelný s generovanou délkou pulsu. Tento požadavek by byl nejlépe splnitelný pro polovodičový diodový laser. Ale vzhledem ke komplikovanější konstrukci **Diode-pumped solid-state LASER (DPSS)** modulu není úplně zřejmé, zda je tohoto stavu možné dosáhnout.



Obrázek 1.4: Zobrazení nejistoty spouštění laseru - modrá křivka znázorňuje čerpání a červená křivka je měřená intenzita výstupního impulzu složená z několika výstřelů laseru.

# Kapitola 2

## Rozbor problému

### 2.1 Druhy modulovatelných laserů

V dnešní době existuje mnoho typů laserů, avšak pouze některé z nich jsou vhodné pro použití v laserových dálkoměrech. Omezením často bývají optické parametry, rozměry aparatury, hmotnost, pořizovací cena, provozní podmínky a odolnost při manipulaci.

#### 2.1.1 Polovodičový diodový LASER

Polovodičové laserové diody, jsou aktuálně nejrozšířenějšími typy laserů, které dosahují dobrých parametrů avšak zatím pouze na vlnových délkah větších než cca 600nm, což pro použití v modelovém laserovém atmosférickém dálkoměru není ideální. Generování kratších vlnových délek pomocí laserových diod je ale v současné době v intenzivním vývoji vzhledem k potenciální možnosti použití modrých, zelených a červených laserů v barevných skenovacích projektorech s vysokým kontrastem a rozlišením.[11] Zatím ale nedosahují potřebných výstupních energií a navíc je jejich pořizovací cena stále poměrně vysoká.

#### 2.1.2 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkový laser byl vůbec prvním spuštěným laserem.<sup>1</sup> Jejich čerpání bylo klasicky prováděno zábleskem výbojky. Už od počátku vzniku prvního laseru byla snaha o jejich využití k laserovému měření vzdálenosti, což bylo zajímavé hlavně pro vojenské aplikace. Vhodný impulz byl většinou generován pasivním Q-spínáním. Tento koncept má ale řadu nepříjemných vlastností, mezi které patří hlavně nízká účinnost (vyzařované spektrum čerpací výbojky se překrývá s absorpčními pásy jenom minimálně), malá životnost (řádově tisíce výstřelů), neboť dochází k opotřebení elektrod výbojky a následné kontaminaci plynové náplně a také postupná degradace Q-spínače například rozkladem UV zářením. Moderní pevnolátkové lasery jsou proto nejčastěji čerpány polovodičovými diodami. Zvláště je to patrné v případech, kdy je jako aktivní

---

<sup>1</sup>Rubínový laser, Maiman, 1960

prostředí využit **Nd:YAG**, nebo **Nd:YVO<sub>4</sub>**. V laserových dálkoměrech mají nadále vedle polovodičových laserů silné zastoupení díky svým kompaktním rozměrům, odolnosti a vysokému špičkovému výkonu.

### 2.1.3 Pevnolátkový diodově čerpaný LASER s generací druhé harmonické

Jde o konstrukci laseru, který jako aktivního prostředí využívá pevnolátkový krystal čerpaný polovodičovou diodou. V rezonátoru laseru je zároveň umístěn konverzní krystal, který díky nelineární optickému jevům umožňuje generovat druhou harmonickou frekvenci základní vlnové délky generované aktivním prostředím. Toto konstrukční uspořádání je známo jako **Diode pumped solid state frequency-doubled LASER (DPSSFD)**.

## 2.2 Metody generace krátkých impulzů

Pro měření vzdálenosti metodou **ToF** je klíčové, aby vysílač mohl generovat krátké světelné impulzy. Obvykle se toho dosahuje několika různými metodami.

### 2.2.1 Volně běžící pulzní režim (PCW)

Volně běžící laser je základní metodou generace laserových pulzů. Princip spočívá v pulzně modulovaném čerpání aktivního prostředí. Laser se pak chová tak, že v době kdy je čerpání pod prahovou úrovní, nedochází ke generování laserového záření. S rostoucí intenzitou čerpání (na náběžné hraně čerpacího pulsu) se však laser postupně dostává přes prahovou úroveň a nejdříve generuje sled krátkých relaxačních impulzů o intenzitě vyšší, než je ustálený kontinuální režim, do kterého tyto pulzy postupně konvergují. Po skončení čerpacího pulzu dochází k postupnému exponenciálnímu snižování výstupní intenzity vlivem nenulové doby života fotonů v rezonátoru. Toto chování je vysvětleno rychlostními rovnicemi popsanými v odstavci [2.3.1](#).

### 2.2.2 Q spínání

V tomto režimu je krátký impulz generován tak, že optickému rezonátoru je nejdříve uměle snížena jakost, aby nemohlo dojít ke stimulované emisi fotonů v rozsahu, jako je tomu za běžného provozu rezonátoru. Následně je aktivní prostředí laseru načerpáno energií z vnějšího zdroje a v okamžiku nasycení je Q rezonátoru skokově zvýšeno. Tím dojde k definované stimulované emisi přes celou délku aktivního prostředí a k vygenerování impulzu s vysokou intensitou záření a energií koncentrovanou v čase. Délka takto vygenerovaného impulzu se pohybuje v řádu ns.

### 2.2.3 Synchronizace módů (Mode-locking)

Mode-locking je dalším vylepšením Q spínáního režimu a generace krátkého impulzu záření se zde dosahuje sesynchronizováním mnoha podélných módů v optickém

rezonátoru tak, že je vždy vybrán pouze mód s největší energií. Metoda je obvykle složitější, protože klade větší nároky na parametry spínače umístěného v rezonátoru, ale je možné tak dosáhnout impulzů se sub-nanosekundovou délkom.

#### 2.2.4 Spínání ziskem (gain switching)

Poslední známou možností, jak laserem generovat krátký světelný impulz je spínání ziskem. Jeho princip spočívá v nastavení pracovního bodu laseru tak, aby úroveň čerpání byla těsně pod prahem laserové generace.

Následně je pak v případě požadavku na vygenerování krátkého impulzu čerpání skokově zvýšeno na maximální úroveň a v okamžiku vzniku impulzu naopak opět sníženo hluboko pod prahovou úroveň. Výsledkem je vygenerování jednoho laserového impulsu, který je sice delší než v případě Q spínání, ale přesto má lepší parametry než impulz vygenerovaný volně běžícím režimem.

### 2.3 Fyzikální model laserového vysílače

K zachycení dějů v aktivním prostředí je zajímavé pokusit se o numerické namodelování laseru. Vzhledem k tomu, že jde převážně o materiálové a těžko měřitelné jevy, je přesné modelování obtížné. Přesto zde bude nastíněn postup, který může tento problém částečně řešit.

#### 2.3.1 Rychlostní rovnice

Rychlostní rovnice jsou základním matematickým popisem dějů v laserovém systému. Jde o soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu, která popisuje časový vývoj inverze populace kvantových stavů v aktivním krystalu a hustotu generovaných fotonů. Pro případ čtyř-hladinového kvantového systému, kterým je například aktivní prostředí Nd:YAG nebo Nd:YVO<sub>4</sub> nabývají tvaru 2.1, 2.2.

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -n_2 c \sigma \phi - \frac{n_2}{\tau_f} + W_p(n_0 - n_2) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c \sigma \phi n_2 - \frac{\phi}{\tau_c} + S. \quad (2.2)$$

Význam jednotlivých proměnných je následující:

$n_2$  - počet excitovaných kvantových stavů v aktivním prostředí

$n_0$  - počet kvantových stavů v základní laserové hladině

$W_p$  - rychlosť čerpání do vyšších kvantových stavů [ $s^{-1}$ ]

$c$  - grupová rychlosť světla v aktivním prostředí ( $c = c_0/n$ )

$\sigma$  - účinný průřez pro stimulovanou emisi [ $\text{cm}^2$ ]

$\phi$  - hustota generovaných fotonů v prostředí [cm<sup>-3</sup>]

$\tau_c$  - doba života fotonu v rezonátoru

$\tau_f$  - doba života na horní laserové hladině  $\frac{1}{\tau_f} = \frac{1}{\tau_{21}} + \frac{1}{\tau_{20}}$

$S$  - odpovídá počáteční úrovni šumu vlivem spontánní emise fotonů  $\phi$  [cm<sup>-3</sup>]

$t$  - čas

### 2.3.2 Relaxační kmity pevnolátkových laserů

Relaxační oscilace jsou hlavním důvodem, proč řada pevnolátkových laserů ne-generuje ve volně běžícím režimu čistý a stabilní výstup. Důvod tohoto chování je součástí principu generace laserového záření. V okamžiku, kdy je do termodynamicky ustáleného aktivního prostředí přiveden zdroj čerpacího záření, je hustota generovaných fotonů velmi malá. V krystalu proto lineárně narůstá inverze populace hladin až nad hodnotu, která by v krystalu existovala v ustáleném režimu generace, neboť v rezonátoru zatím neexistují fotony, které by způsobily stimulovanou emisi záření. První spontánní emise fotonu však způsobí hromadnou stimulovanou emisi záření a vzhledem k tomu, že inverze populace dosáhla podstatně vyšší hodnoty, než která existuje v ustáleném stavu, tak i hustota fotonů v rezonátoru dosáhne vyšších hodnot. Protože ale vysoká hustota generovaných fotonů v rezonátoru znamená rychlou depopulaci excitovaných hladin (podstatně rychlejší, než je rychlosť čerpání), dojde ke ztrátě inverzní populace až výrazně pod hodnotu ustáleného stavu a tedy i hustota fotonů v rezonátoru klesne na minimální úroveň a inverzní populace hladin začne opět narůstat. Tím se uzavře cyklus, který způsobí opakování generování stejných nebo podobných světelných impulzů na výstupu laseru.

K exaktnímu popisu tohoto jevu je možné využít rychlostní rovnice. Na začátku cyklu je úroveň stimulované emise zanedbatelná, protože hustota generovaných fotonů v rezonátoru se blíží nule. Proto inverze populace hladin může být vyjádřena vztahem (2.3) a roste lineárně s časem.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = W_p n_0 \quad (2.3)$$

Následně začíná vlivem spontánní emise narůstat hustota fotonů v rezonátoru a naopak se stává zanedbatelná rychlosť čerpání i ztráty v rezonátoru. Rychlostní rovnice pak nabývají tvaru 2.4 a 2.5.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -nc\sigma\phi \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c\sigma\phi n \quad (2.5)$$

A empiricky popisují efekt relaxačních oscilací. Ve značném množství aplikací ale jde o jev nežádoucí a proto se pokusy o jejich aktivní tlumení datují již do roku

1962 [4]. K tomuto účelu byly využívány elementy v podobě Kerrovy cely, Pockelsovy cely nebo akusto-optické modulátory. Moderní diodově čerpané lasery s velmi nízkým šumem využívají monolitické konstrukce rezonátoru s konduktivním odvodem tepla a rychlou elektronickou zpětnou vazbu ovlivňující čerpání.

### 2.3.3 Spínání impulzu ziskem

Gain switching, neboli spínání ziskem je principiálně přesným opakem regulace laseru s aktivním potlačením relaxačních oscilací, neboť relaxační oscilace lze využít i ke generaci krátkých impulzů s vyšším výkonem, než by bylo možné ve volně běžícím režimu. V případě, že je laser čerpan z jiného pulzního laseru, je možné v aktivním prostředí vytvořit nadkritickou inverzi populace podstatně dříve, než dojde k naplnění rezonátoru generovanými fotony. Pokud navíc čerpací zdroj umožňuje rychlou modulaci a čerpání je deaktivováno v době generace výstupního záření, dojde k propadu inverze populace hladin hluboko pod kritickou úroveň a další impulz už generován není.

Prakticky bývá tato metoda implementována tak, že v případě diodově čerpaného pevnolátkového laseru je pracovní bod laserové diody nastaven těsně pod prahovou úroveň generace pevnolátkového laseru a několik mikrosekund před požadovaným vygenerováním impulzu je intenzita čerpání skokově zvýšena a v okamžiku vzniku výstupního impulzu je čerpání vypnuto. Tím dojde k vygenerování jednoho relaxačního kmitu laseru, který je navíc kratší, než relaxační impulz ve volně běžícím režimu[12].

Rozdíl oproti Q spínání je především v tom, že v tomto případě je před vygenerováním impulzu v inverzi populace hladin skladováno pouze minimum energie a nedochází proto k tak silnému nárůstu výstupního výkonu oproti výkonu čerpání. V případě gain switchingu je délka a výkon výstupního impulzu srovnatelná s čerpacím impulzem.

### 2.3.4 Generace druhé harmonické

Samotná generace druhé harmonické je nelineárním optickým jevem v materiálu konverzního krystalu. Nejčastěji se využívají materiály **KDP** nebo **KTP**. Pro akceptovatelnou konverzní účinnost je však třeba dosáhnout velkých intenzit budícího záření (řádově desítky MW/cm<sup>2</sup>) [4]. Splnění takové podmínky mimo laserový rezonátor není jednoduché, proto se u **DPSSFD** modulů umisťuje konverzní krystal přímo do laserového oscilátoru společně s aktivním prostředím. Zrcadla rezonátoru jsou pak vyrobena tak, aby budící záření 1064nm unikalo z rezonátoru jenom v minimální míře, výstupní zrcadlo má pak naopak ideální propustnost pro zkonzervované záření 532nm.

Učinnost konverze budícího záření na druhou harmonickou pak závisí na několika proměnných podle vztahu.

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \tanh^2 \left[ lK^{\frac{1}{2}} \left( \frac{P_\omega}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sin \Delta kl/2}{\Delta kl/2} \right] \quad (2.6)$$

Kde  $K$  je materiálovou konstantou vyjádřenou vztahem  $K = 2Z^3\omega_1 d_{eff}$

$P_{2\omega}$  - výkon vygenerované druhé harmonické vlny

$P_\omega$  - výkon budící vlny

$\omega_1$  - úhlová frekvence budící vlny

$Z$  - impedance  $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0\epsilon}$

$d_{eff}$  - koeficient efektivní nelinearity prostředí s rozměrem [m/V]

$l$  - délka konverzního krystalu

$A$  - plocha budícího svazku

$\Delta k$  - rozdíl vlnových čísel  $\frac{4\pi}{\lambda_1}(n_\omega - n_{2\omega})$

V sestaveném laserovém systému je většina parametrů fixních, kromě rozdílu vlnových čísel (rozfázování svazků)  $\Delta k$ , který je značně závislý na teplotě. [4]

## 2.4 Dosavadní řešení problému

Existuje již mnoho typů meteorologických přístrojů určených k měření výšky základny oblačnosti. Například jsou to laserové ceilometry <sup>2</sup> Vaisala CL51 a CL31 oba využívající jako vysílač polovodičovou InGaAs diodu pracující na vlnové délce 910 nm. Detektor a vysílač mají koaxiální optiku s jednou společnou vnější čočkou. Rozlišení přístroje je 5m. Energii ve výstupním impulzu výrobce neudává, ale zařízení je deklarováno jako Class 1M IEC/EN 60825-1, což znamená, že bezpečnosti je v tomto případě dosahováno zvětšením průřezu svazku tak, že hodnota MPE nepřekročí limit  $1\mu\text{J}/\text{cm}^2$  při délce impulzu 10ns.

Tato profesionální řešení mají pro použití v kombinaci s robotickým dalekohledem společnou nevýhodu, že jejich cena je srovnatelná, nebo vyšší než hodnota dalšího vybavení robotizované observatoře. Tím pádem se pro tuto aplikaci stávají nedostupné.

Proto bylo v minulosti speciálně pro aplikaci zabezpečení automatických teleskopů před poškozením možnými srážkami vyvinuto již několik přístrojů, většinou pracujících na principu pasivní detekce termálního IR záření generovaného povrchem Země a odraženého zpět od případné oblačnosti v atmosféře.

Tato metoda je velmi spolehlivá a používá se na mnoha automatických observatořích po celém světě. Má však ale díky svému pasivnímu principu nedostatky způsobené jednak roční variabilitou teploty atmosféry a také geografickou polohou, proto vyžaduje poměrně dlouhotrvající kalibraci zařízení na lokální podmínky. Další nevýhodou je pak také malé prostorové rozlišení. Například senzor MRAKOMĚR 4 [13] má FOV  $120^\circ$  což způsobuje komplikace při některých meteorologických situacích, kdy se například nad observatoří vyskytuje hustá kumulovitá oblačnost avšak místy obsahující trhliny, kterými by bylo možné potenciálně některé astronomické jevy ještě pozorovat.

---

<sup>2</sup>První optické ceilometry využívaly triangulační metodu měření vzdálenosti, kde byla oblačnost nasvětlována výkonným reflertorem.

## 2.4.1 Jiné ToF dálkoměry

Značné množství podobných konstrukcí využívá ke generaci laserového impulzu Q-spínáný pevnolátkový laser, nebo pulzně buzenou polovodičovou diodou.

Například jeden z nejmenších komerčních dálkoměrů MLR100 [14], určený pro využití v UAV systémech, generuje impulz o délce 15ns FWHM pomocí polovodičového systému **Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)** s vlnovou délkou 940nm. Elektronický pulzer využívá lavinového průrazu tranzistoru a generuje špičkové proudy až 100A. Špičkový výkon laserového pulzu je 64W v prostorovém úhlu 14° FWHM. Na výstupní apertuře má svazek průměr 1cm a výrobce díky tomu opět deklaruje třídu bezpečnosti 1M. Jako detektor je využita PIN dioda. Měřící rozsah přístroje je do 100m s rozlišením 20cm.

Dále bylo zkonstruováno již mnoho experimentálních LRF. Pevnolátkový diodově čerpaný laser s pasivním Q-spínáním využívá konstrukce ze zdroje [15], pracuje na vlnové délce 946nm a energie ve výstupním pulzu je  $10 \mu\text{J}$ . Opakovací frekvence při kontinuálním čerpání je 16kHz.

Zvláště nízkou energii v pulzu používá jednofotonový atmosférický LIDAR již dříve vyvinutý na FJFI, kde energie pulzu je pouze 0,5uJ a divergence svazku  $0,5 \times 0,1 \text{ mrad}$ , pracovní vlnová délka 800–904nm, délka pulzu 100ns, což odpovídá špičkovému výkonu 5W. Průměr výstupní apertury vysílače je 25mm, optika přijímače má průměr 10mm a umožňuje i denní měření [8].

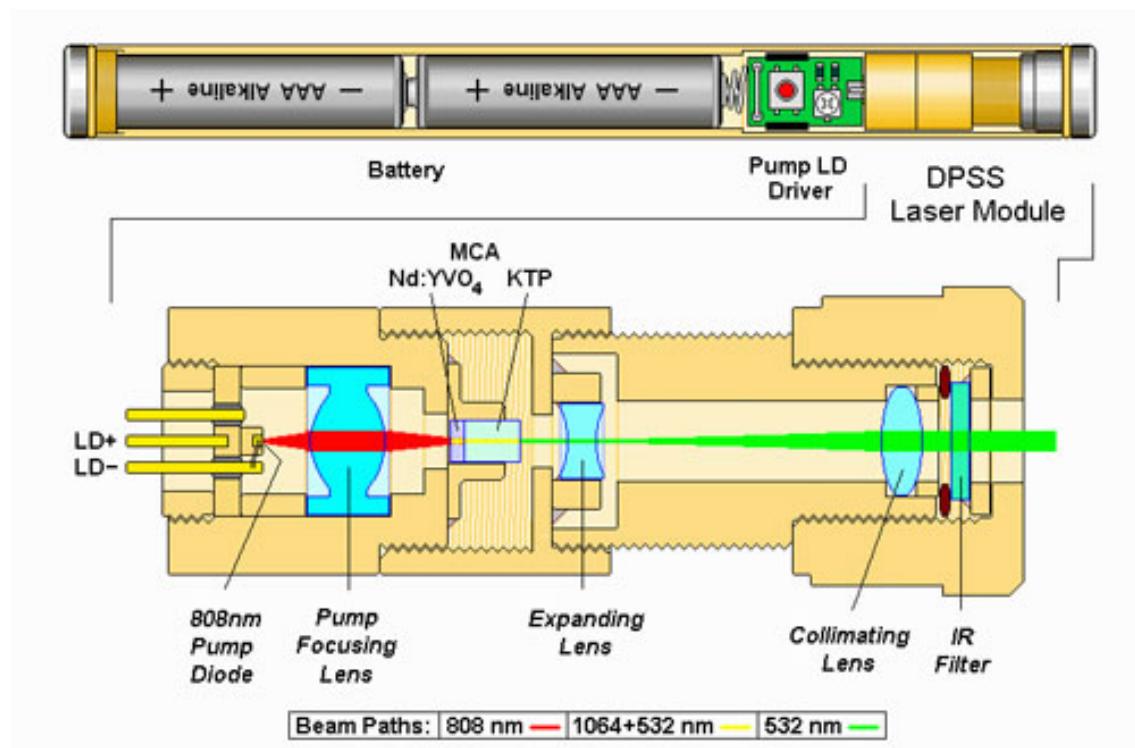
Z těchto parametrů existujících dálkoměrů lze vyvodit, že určitě postačující energie v pulzu vysílače by měla být desetiny až jednotky  $\mu\text{J}$ .

# Kapitola 3

## Řešení

### 3.1 Konstrukce DPSSFD modulu

Typická konfigurace levného diodově čerpaného laseru s generováním druhé harmonické 532nm je zobrazena na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Typická konstrukce diodově čerpaného pevnolátkového laseru používaného jako zelené laserové ukazovátko. [3]

### 3.1.1 Čerpací dioda

Pоловodičová čerpací dioda, která je na obrázku (3.1) vlevo může mít obecně několik možností konstrukce. Samotné pouzdro diody však obvykle obsahuje kromě laserové diody generující výstupní svazek, ještě referenční fotodiodu, sloužící k získání zpětné vazby z výkonu vystupujícího svazku záření [16]. Tyto dvě diody mají běžně společný jeden vývod. A protože každá z diod má interně dva vývody, je možných několik způsobů zapojení v pouzdře. Označují se písmeny P, N, M viz. obr. 3.14. Referenční dioda pak bývá rozlišována jako **Monitor Diode (MD)** a laserová dioda jako **LASER Diode (LD)**. Referenční zpětnovazebná fotodioda se však nedá použít ke kalibračním účelům, protože takto indikovaný výkon má mezi jednotlivými várkami laserů rozptyl až jeden řád [17].

Vyzařovaná vlnová délka LD diody je poměrně silně závislá na teplotě přechodu v polovodičové struktuře a u běžných GaAlAs diod se teplotní koeficient změny vlnové délky pohybuje okolo hodnoty  $0,25\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ . To je zvláště kritické při použití aktivního prostředí Nd:YAG, jehož nejúčinnější absorpční čára na  $807,5\text{ nm}$  je široká pouze  $\sim 1\text{nm}$ , což klade poměrně vysoké nároky na stabilizaci teploty PN přechodu. Vysoká provozní teplota čerpací laserové diody navíc vede ke zvýšení prahu laserové generace a tím pádem i ke zvýšení potřebného budícího proudu, který má za následek vyšší ztrátový výkon. Dalším problémem, který při vysokých pracovních teplotách může nastat, je mode-hopping, který se projevuje náhodným přeskakováním vyzařovaných vlnových délek [17]. Z tohoto důvodu, byl pro měření celý modul společně s čerpací diodou vybaven masivním chladičem umožňujícím dobrý odvod tepla z laserového systému.

Bezprostředně za diodou je u některých konstrukcí modulů čočka, která upravuje záření vycházejí z laserové diody tak, aby bylo možné jej navázat skrz dielektrické zrcadlo na čele krystalu do rezonátoru a čerpat jím aktivní prostředí Nd:YVO<sub>4</sub>. V testovaných modulech byla ale čočka vynechána a vazba čerpací diody s rezonátorem je tvořena pouze přímým kontaktem aktivního krystalu a čela diody.

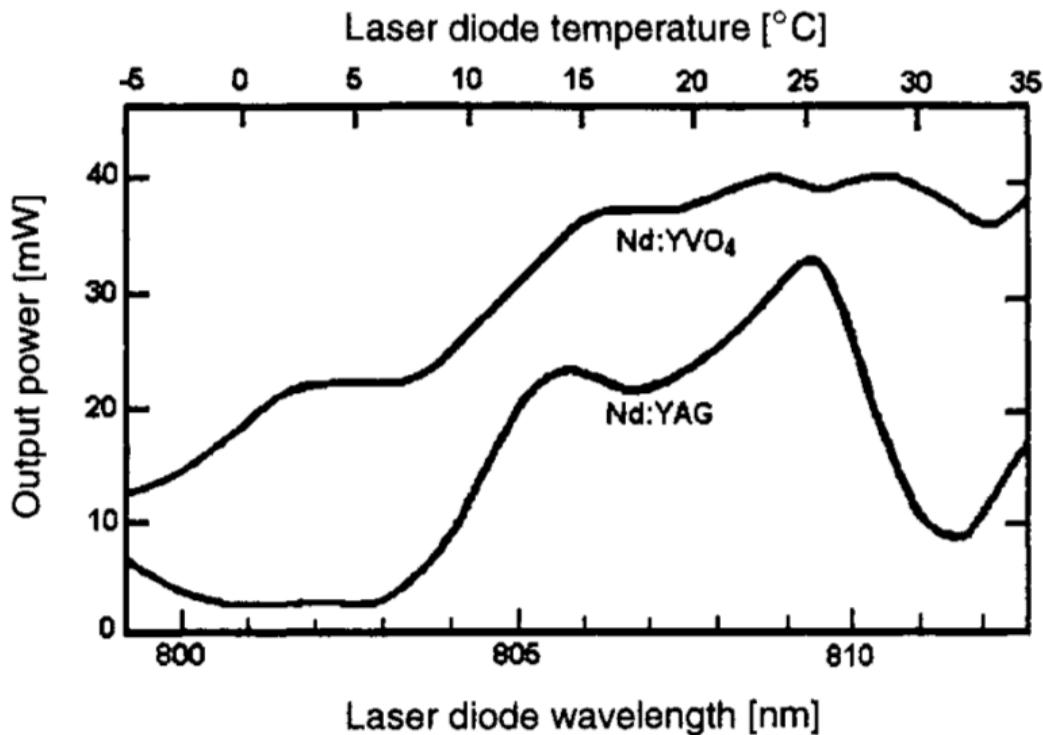
### 3.1.2 Aktivní prostření a konverzní krystal

Aktivním prostředím v laserovém modulu je obvykle krystal Nd:YVO<sub>4</sub> kombinovaný s konverzním krystalem KTP do bloku o rozměrech  $1\times 1\times 3\text{mm}$ , který je přímo nalepený na mosazném držáku zajišťujícím odvod tepla. Přes tento držák krystalu je našroubovaný další mosazný díl, který obsahuje expanzní čočku a IR filtr. Je možné, že tento prostřední díl společně s čočkou funguje částečně jako čerpací dutina, protože při jeho odmontování byl pozorován pokles intenzity výstupního záření.

U starších konstrukcí laserových ukazovátek může být konverzní krystal KTP oddělený a aktivní prostředí je pak tvořeno samostatným krystalem Nd:YAG nebo výjimečně Nd:YLF [3].

Použití aktivního prostředí Nd:YVO<sub>4</sub> je však výhodné díky většímu účinnému průřezu stimulované emise, který je  $5x$  větší, než u Nd:YAG a zároveň má také širší absorpční pás, takže modul může pracovat při větším rozsahu teplot. I přes tyto parametry a fakt, že materiál Nd:YVO<sub>4</sub> byl objeven už v roce 1966, byly velkou překážkou jeho širokého použití problémy s růstem krystalů dostatečné velikosti vhodné pro výbo-

jkové čerpání. Tento problém se však již z velké části podařilo překonat koherentním čerpáním polovodičovými laserovými diodami, kde se navíc využívá silné absorpce čerpacího záření v materiálu, takže stačí krystaly o rozměrech pouze několik milimetrů [4].



Obrázek 3.2: Výstupní výkon typického Nd:YVO<sub>4</sub> laseru v závislosti na teplotě diody a vlnové délce [4].

Ze zmárných rozměrů krystalu je také možné se pokusit o odhad bilance extra-hovatelné energie z ideálně načerpaného krystalu. Samotné aktivní prostředí z bloku 1x1x3mm v DPSSFD modulu tvoří přibližně 1/3 tedy 1mm<sup>3</sup>. Pokud předpokládáme 1% dopaci, tak 1mm<sup>3</sup> obsahuje přibližně  $N = 1,38 \times 10^{17}$  aktivních atomů Nd. Z energie fotonu vlnové délky  $\lambda = 1064\text{nm}$  pak podle vztahu 3.1 odhadneme, že maximální energie  $E_k$  extra-hovatelná z krystalu Nd:YAG nebo Nd:YVO<sub>4</sub> v ukazovátku je  $\sim 26$  [mJ].

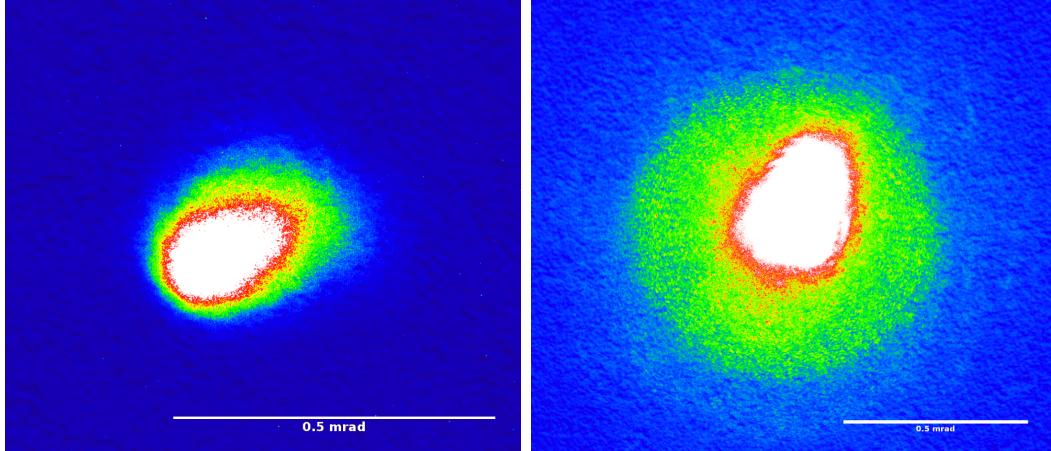
$$E_k = E_{pho}N = \frac{hc}{\lambda}N \quad (3.1)$$

Tato hodnota sice určitě není za běžných podmínek dosažitelná, nicméně dává představu o limitech pevnolátkového laseru v modulu.

### 3.1.3 Kolimace výstupního svazku a výstupní IR filtr

Výstupní záření vycházející z optického rezonátoru je ideálně pouze 532nm, které je kolimováno do výstupního svazku s divergencí menší než 0,5mrad. Vzhledem

k přesnosti výroby a poměrně vysokých výkonů koherentního čerpání je na výstupu laseru ještě z bezpečnostních důvodů zařazen IR filtr, který odstraní případné zbytky čerpacího záření, nebo nezkonvertované záření 1064nm vycházející z dutiny rezonátoru. Umístění filtru je různé, může být nalepen za expanzní čočku nebo na díl s kolimační čočkou, není ovšem ani vyloučeno, že u některých modulů může být tento filtr úplně vynechán.



Obrázek 3.3: Promítané stopy svazků ve vzdálenosti 20m od modulu. Vlevo modul 5mW, napravo varianta 20mW. Měřítko vpravo dole má rozměr 0,5mrad.

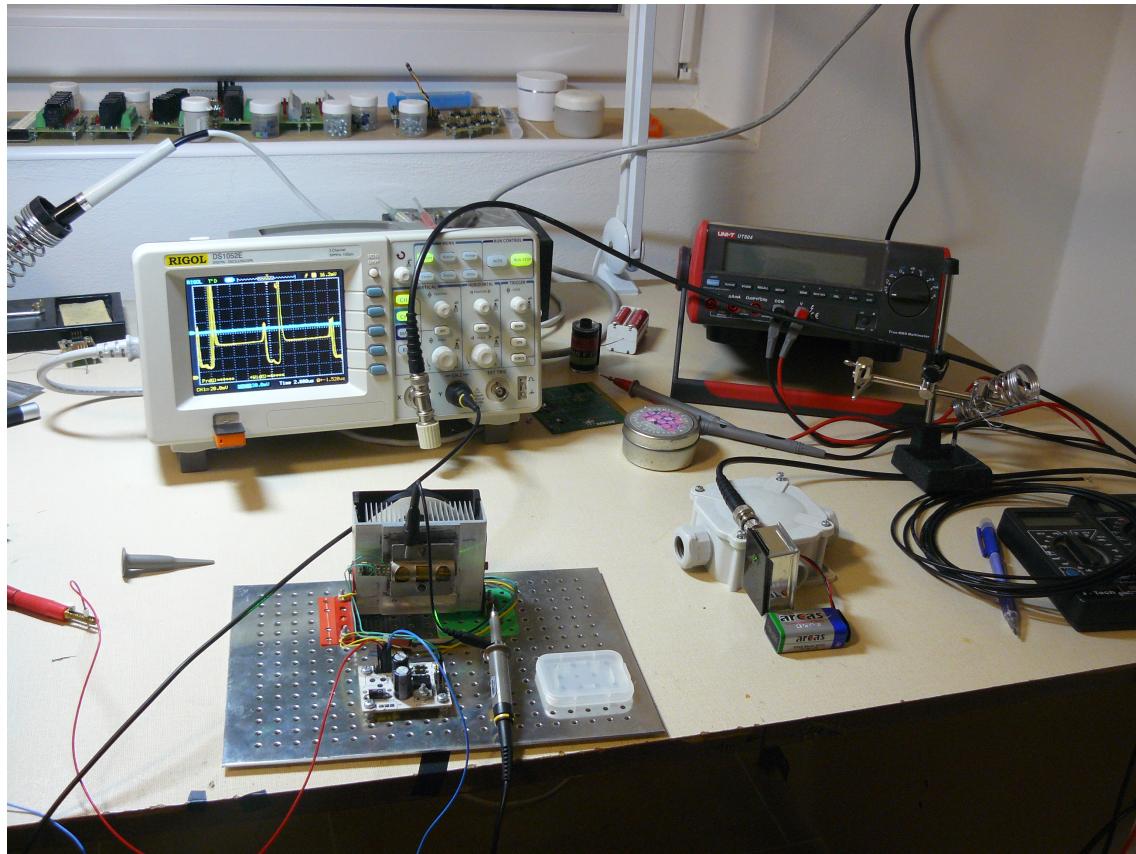
Pro oba typy testovaných modulů byl změřen profil svazku ve vzdálené zóně. Měření bylo provedeno zaměřením modulu na 20m vzdálenou stěnu a vyfotografováním vzniklé stopy společně se stupnicí dělenou po mm bylo možné zkalibrovat úhlové rozlišení snímku. Jas snímků kalibrován není a obrázek tak proto dává přibližnou představu pouze o rozdílovosti svazků. Naměřené hodnoty  $0,2 \times 0,3$  mrad a  $0,15 \times 0,2$  mrad lze považovat spíše za horní hranice rozdílovosti svazku pro tovární nastavení modulů, neboť modul byl před měřením několikrát rozebrán z důvodu průzkumu jeho obsahu, což mělo negativní vliv na přesnost kolimace. Naměřené hodnoty jsou ale srovnatelné, nebo lepší, než předpokládaná hodnota divergence 0,27 mrad spočítaná z rozměrů modulů, (viz. sekce 3.2).

Tyto hodnoty divergence jsou pro uvažovanou aplikaci více než dostatečné, neboť i největší stopa svazku o divergenci 0,5 mrad bude mít ve výšce 1km nad detektorem rozdíl pouze 0,5m což je zaručeně méně, než velikost základny kumulu, nebo kumulonimbus. S ohledem na bezpečnost je tato divergence dokonce zbytečně nízká a bylo by vhodné zvážit rekolumaci svazku tak, aby zařízení spadalo do bezpečnostní třídy 1M.

### 3.1.4 Původní regulační obvod

Původní regulační obvod laseru se skládal z operačního zesilovače zapojeného jako velmi jednoduchý lineární zdroj proudu. Protože takto konstruovaný zdroj proudu má poměrně velký ztrátový výkon a použité součástky jsou vesměs poddimenzovány,

není možné v zapnutém stavu provozovat ukazovátko delší dobu, ani na něm provádět měření. Tento problém lze ale vyřešit náhradou regulačního obvodu a přidáním chladiče (viz. odstavec 3.11).



Obrázek 3.4: Měření prováděné s původním regulačním obvodem.

## 3.2 Parametry laserových modulů

Všechny tyto běžně dostupné moduly jsou válcové o průměru  $(11,9 \pm 0,1)\text{mm}$  délky 40mm (20mW) nebo 35mm (5mW). Na výstupní části je 10mm dlouhé osazení s jemným závitem M8 respektive M10. Výstupní apertura modulů je 3,9mm. Průměr svazku na výstupní apertuře je přibližně 2,5mm (změřeno posuvným měřítkem).

Z těchto parametrů lze tak podle výrazu 1.4 určit difrakčně limitovanou minimální divergenci svazku 0,27mrad.

### 3.2.1 Běžné provozní hodnoty

Za běžných provozních hodnot je laserový modul provozován v pracovním bodě uvedeném v tabulce 3.1 a záření vystupující z modulu nemá výraznou časovou strukturu.



Obrázek 3.5: Použité testovací DPSSFD moduly 5mW (vlevo)[5] a 20mW (vpravo) [6].

Tabulka 3.1: Parametry laserového modulu s původním regulátorem

Parametr	hodnota
Výstupní výkon CW [mW]	20
Napěťový úbytek na LD [V]	2,24
Proud čerpací diodou [mA]	167-230 Závisí na teplotě a typu modulu

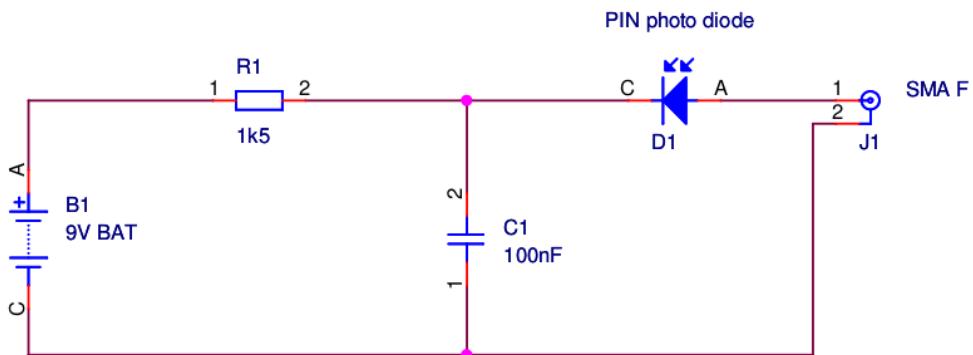
### 3.2.2 Rozdíly mezi laserovými moduly

Hlavní rozdíl mezi moduly je výrobcem udávaný kontinuální výstupní výkon modulu a pracovní napětí, které je u 20mW modulu udáváno jako 3V a u 5mW modulu 5V. U testovaných levných laserových modulů nebyl zjištěn žádný výrazný konstrukční rozdíl. Pouze výkonnější z modulů (20mW) má masivnější materiál okolo výstupní optiky, patrně kvůli zlepšení přestupu odpadního tepla do pláště ukazovátka. Ostatní části jsou identické u obou výkonových verzí včetně samotného aktivního krystalu. Nelze však jednoduše potvrdit, že je identická i samotná čerpací dioda, neboť na jejím pouzdře chybí typové označení. Existuje možnost, že je uvedeno na boční straně diody, ale k němu se nelze jednoduchým způsobem dostat bez totální destrukce modulu, protože čerpací dioda je zalepena v masivním mosazném elementu. Původní řídící elektronika je taktéž stejná u obou modulů a neliší se ani hodnotami součástek.

Optický výstupní výkon modulů byl změřen miliwattmetrem a bylo zjištěno, že v základním nastavení se výstupní výkony všech testovaných modulů s výstupním závitem M10 pohybují okolo 20mW CW nezávisle na objednaném typu (5mW, 10mW, 20mW).

## 3.3 Měření krátkých světelných impulzů

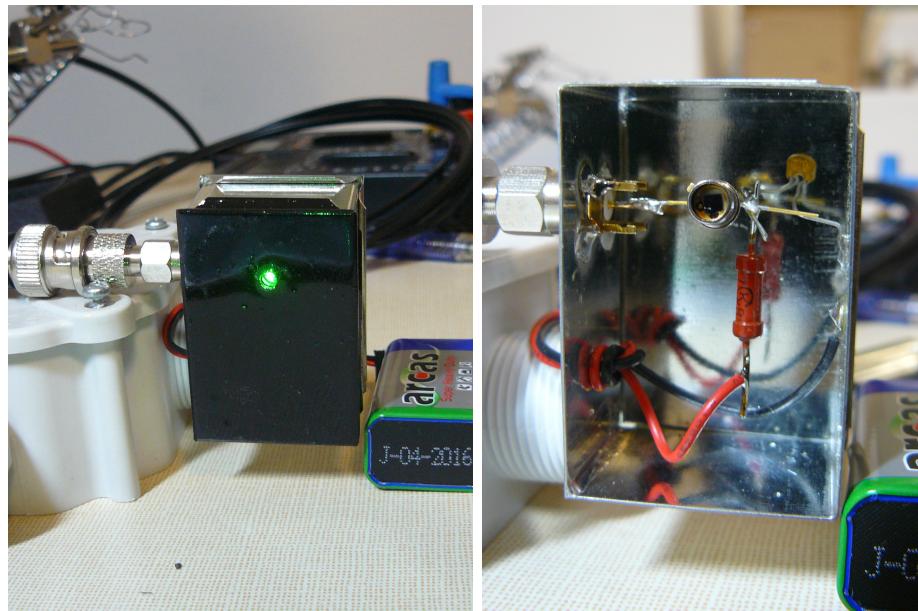
K tomu, aby bylo možné kvantifikovat dosažené parametry laserového vysílače, je potřeba umět změřit i výstupní časový průběh intenzity záření v impulzu. K tomuto účelu se obvykle využívá zapojení předepojaté PIN fotodiody, která pak díky svojí nízké parazitní kapacitě pracuje jako vhodný snímač pro velmi rychlé děje. Pro účely měření byl jeden takový snímač zkonztruován. Jeho zapojení je znázorněno na obrázku 3.6. Použitá PIN dioda je CENTRONIC - OSD1-5T s kapacitou přechodu 7pF a aktivní plochou 1mm<sup>2</sup> [18].



Obrázek 3.6: Schéma detektoru s PIN diodou.

PIN dioda je v tomto případě kvůli jednoduchosti konstrukce a odstranění

možnosti rušení ze zdroje napájena baterií 9V. Na výstupní konektor **SMA**-zásuvka se připojuje koaxiálním kabelem RG174 osciloskop impedančně přizpůsobený na 50 Ohm. Snížená impedance je zde důležitá, kvůli možnosti rychlého odvedení náboje z přechodu diody.



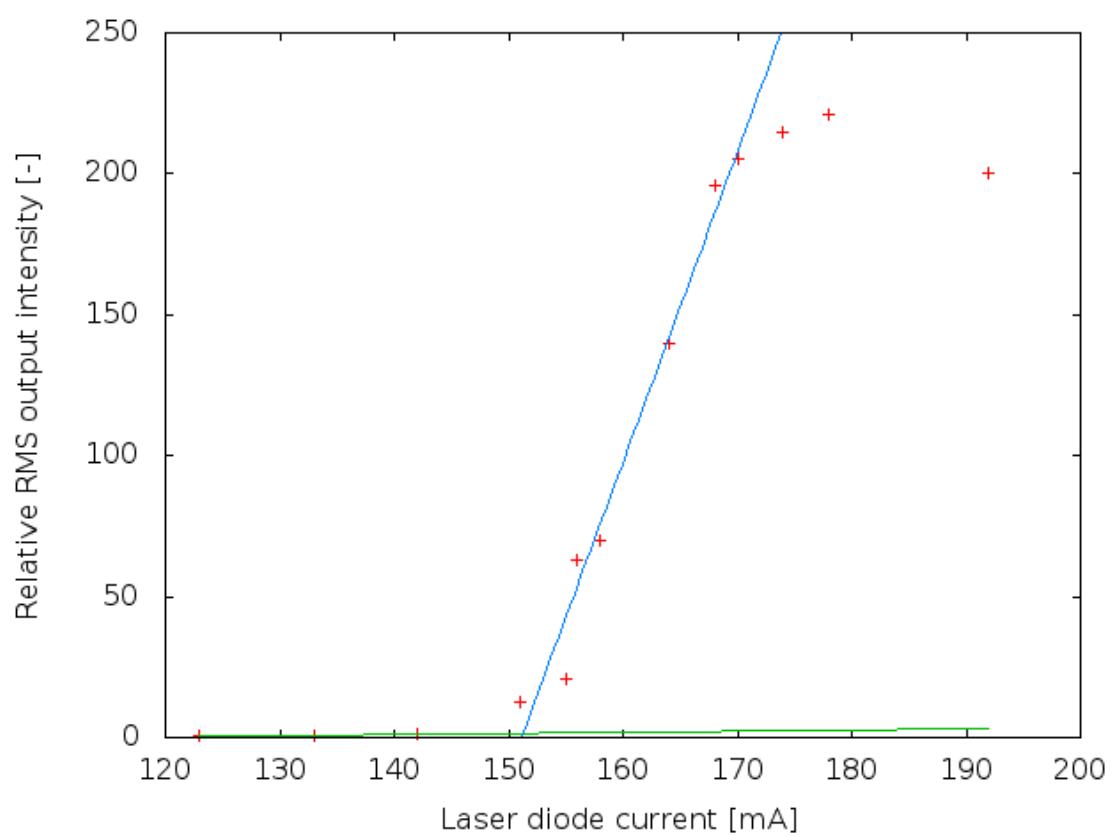
Obrázek 3.7: Realizovaný detektor časového průběhu záření.

### 3.4 Relaxační kmity DPSSFD modulu

Během měření charakteristik modulů na zkonstruovaném zdroji proudu bylo zjištěno, že existuje pracovní oblast, kde dochází k samovolné pulzní modulaci výstupního záření. Tato oblast se nachází těsně nad prahem laserové generace v oblasti proudů 150–160mA a lze jí nalézt postupným zvyšováním čerpacího výkonu a sledováním časové charakteristiky výstupního záření. Ukázky takto získaných výstupů jsou na oscilogramech 3.9 a 3.10. Při určitém proudu dosahuje pulzní modulace maximálního kontrastu (u měřených modulů 156mA při 20°C) a při dalším zvyšování intenzity čerpání se pulzy rozlévají i do oblastí s původně nulovou intenzitou záření. Až při dosažení běžného pracovního bodu je výstupní záření téměř konstantní v čase.

Konkrétní pracovní bod ve kterém k takovým kmitům dojde je ale závislý na podmínkách, ve kterých je laserový modul provozován. Podle pozorování má na tento jev vliv hlavně teplota modulu. Na grafu 3.11 je znázorněn naměřený průběh střední intenzity záření jednoho z modulů (měřeno PIN detektorem a vypočítáno z plochy signálu). Při vyšších proudech je patrný pokles výstupní intenzity způsobený pravděpodobně zahřátím modulu a poklesem účinnosti.

Jednou z uvažovaných konstrukčních variant vysílače pro laserový dálkoměr bylo využití těchto autonomních kmitů laseru jako zdroje vhodných laserových impulzů.

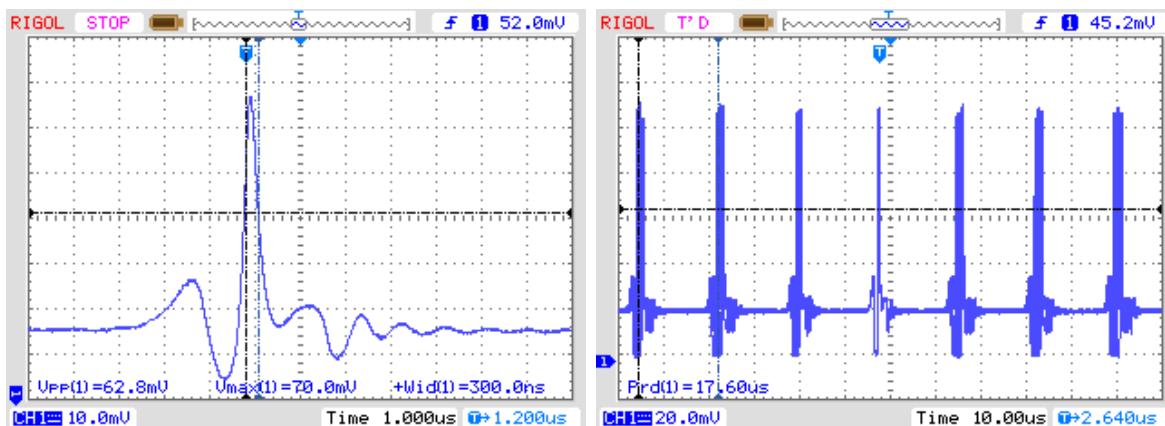


Obrázek 3.8: Závislost intenzity výstupního záření na proudu čerpací diodou.

Ovšem vzhledem k nestabilitě tohoto režimu by tato možnost vyžadovala stabilizaci tohoto stavu regulačním obvodem, čehož by bylo pravděpodobně možné dosáhnout Fourierovým rozkladem výstupního signálu a analýzou frekvenčních komponent. Ale vzhledem k faktu, že průběhy generované jednotlivými typy laserů nejsou naprosto identické, byla by tato cesta velmi komplikovaná. Navíc při měření výstupní energie těchto relaxačních oscilací se ukázalo, že energie obsažená v jenom pulzu se pohybuje v rozsahu jednotek nJ.

Konkrétně byla změřena hodnota 5,7 nJ při opakovací frekvenci 56 kHz. Měření je navíc pravděpodobně zatíženo chybou s faktorem 2–3, neboť energie v impulzu je spočítána ze středního výkonu výstupního záření, ale intenzita výstupního záření mezi impulzy neklesá až k nule. Skutečná energie v impulzu proto pravděpodobně bude ještě menší. A proto energii nelze považovat za dostatečný výsledek i přes to, že laserový vysílač má pracovat hlavně v noci, a tudíž by bylo možné zvyšování optické účinnosti z rovnice (1.2) zvětšováním vstupní apertury teleskopu přijímače. Velká vstupní apertura detektoru je ale z konstrukčních důvodů nepraktická.

Proto bylo zvoleno méně komplikované řešení – generování impulzů pulzním čerpáním a využití techniky spínání ziskem.

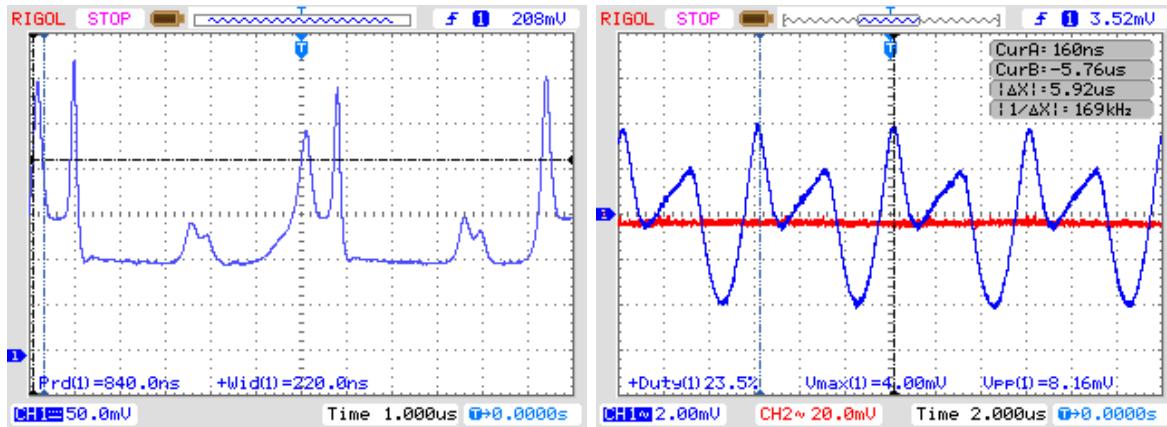


Obrázek 3.9: Časové průběhy výstupních impulzů laseru pro 20mW modul (typ s větší výstupní hlavou M10) s vhodně nastaveným pracovním bodem.

Autonomně generovaných relaxačních kmitů bylo možné dosáhnout již s původním regulačním obvodem, kdy byl původní regulátor napájen nastavitelným zdrojem napětí LM108601A [19], čímž bylo možné omezit provozní proud laserové diody. Avšak vzhledem k tomu, že původní regulátor je výkonově poddimenzován, nebylo možné modul takovým způsobem používat delší dobu.

### 3.5 Vlastní řídící elektronika

Aby bylo možné uvažovat o použití těchto laserových modulů, jako laserového dálkoměru, je z výše popsaných důvodů nutné změnit způsob regulace laserového systému.



Obrázek 3.10: Průběh výstupních impulzů v případě použití 5mW verze modulu (typ s menší výstupní hlavou M8).

### 3.5.1 Stabilizovaný zdroj proudu

Stabilizovaný zdroj proudu byl jedním z prvních pokusů o zlepšení parametrů stávající regulace. Je zkonstruován opět jako lineární zdroj, ale jako výstupní budič je použit výkonový operační zesilovač L165. Proud je stabilizován udržováním napěťového úbytku na měřícím odporu. Tato hodnota je nastavována odporovým děličem realizovaným mnohootáčkovým potenciometrem  $2k\Omega$  ze zdroje referenčního napětí LM431. Na měřícím odporu je pak výstupem operačního zesilovače udržováno nastavené referenční napětí. Celý proudový zdroj je zkonstruovaný z následujících modulů stavebnice MLAB [20].

**OZPOWER01A** - Modul výkonového operačního zesilovače použitelného do 18V/3A.

Je použit jako výkonový regulační stupeň pro regulaci proudu laserovou diodou [21].

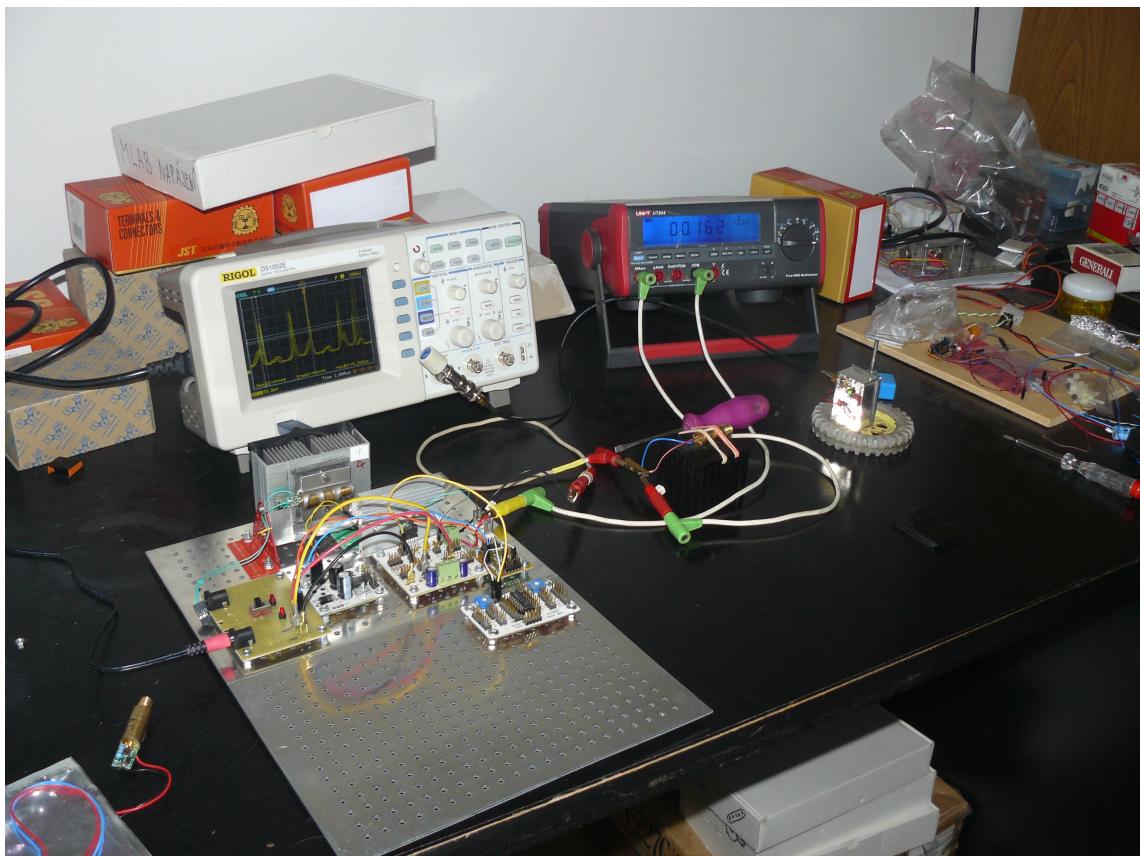
**OZdual02B** - Modul určený pro obecný dvojitý operační zesilovač společně s obvodem pro napěťovou referenci. V tomto případě je použit pouze jako zdroj referenčního napětí. [22]

**UNIPOWER02A** - Napájecí modul s proudovou pojistkou a ochranou proti přepólování.

Použití tohoto konstrukčního systému umožnilo zkonstruování variabilního laboratorního prototypu vysílače generujícího zesílené šumové impulzy. Ale vzhledem k principiálním problémům stabilizace pracovního bodu v režimu autonomních oscilací je nastavení vhodného budícího proudu ponecháno na uživateli prototypu.

### 3.5.2 Pulzní budič laserové diody

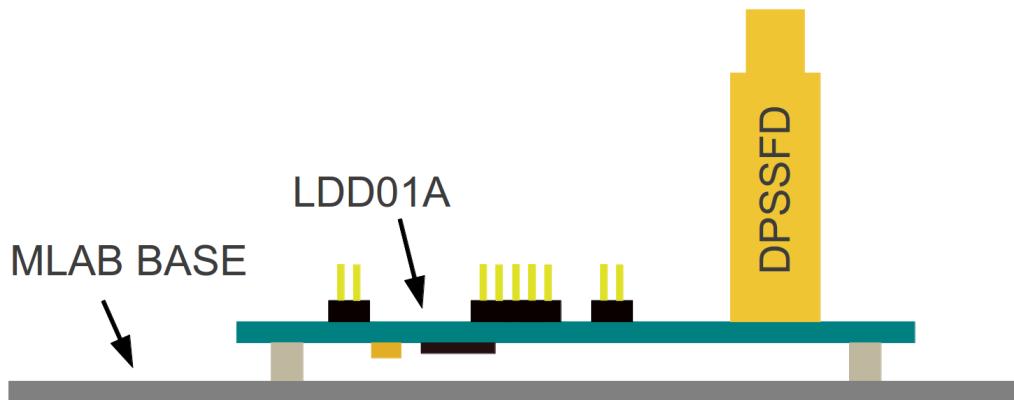
Pulzní budič čerpací diody je vylepšením původního experimentu se zdrojem proudu. Je zkonstruován tak, aby umožnil kontinuální provoz i v dříve ověřeném režimu autonomních oscilací, čehož je dosaženo možností stabilizace budícího proudu v kontinuálním režimu.



Obrázek 3.11: Aparatura použitá pro měření intenzity optického výstupu v závislosti na budícím proudu.

Tabulka 3.2: Parametry laserového modulu napájeného zkonstruovaným zdrojem proudu.

Parametr	hodnota
Střední výkon [uW]	320
Energie v impulzu [nJ]	4,3–5,7
Opakovací frekvence [kHz]	56–74
Divergence výstupního svazku [mrad]	0,3x0,2



Obrázek 3.12: Koncepce použití navrženého pulzního budiče.

Vzhledem k tomu, že od pulzního budiče jsou vyžadovány vysoké nároky na strmost proudových impulzů při proudech v rozsahu stovek mA, není vhodným řešením konstrukce budiče z diskrétních součástek, neboť neumožňuje snížení parazitních indukčností a kapacit na nejnižší možnou úroveň. Tento fakt, kromě samotné možnosti generace krátkých impulzů komplikuje i nároky na stínění z důvodu zajištění elektromagnetické kompatibility. Integrované řešení navíc umožňuje dosáhnout vyšší spolehlivosti, protože snižuje počet pájených spojů. Moderní integrované obvody určené pro napájení laserových diod mají také další bezpečnostní funkce, jako je ochrana proti přepólování nebo přepětí [23].

Při návrhu tohoto typu budiče pro laserovou diodu bylo uvažováno o použití několika různých integrovaných obvodů. Jako velice perspektivní se zdaly být obvody určené pro vysokorychlostní optické spoje. Od jejich použití bylo ale nakonec ustoupeno z důvodu jejich obecně malého budícího výkonu, a také kvůli vlastnostem specifickým pro optické přenosy, což znamená například předpoklad 50% střídy signálu a také často implementované automatické regulační a měřící funkce, které nelze jednoduše ovlivnit. V následujícím seznamu je uveden souhrn uvažovaných obvodů.

**CX02068** - obvod pro buzení laserových diod pro optické spoje. Náběžná a sestupná hrana má délku menší než 180ps. Nedostatek je však nízký bias proud, který je maximálně 100mA a modulační proud pouze 85mA.

**ADN2830** - je regulátor pro laserové diody pracující v CW režimu. Umožňuje poměrně vysoký provozní proud laserových diod (do 200mA). Regulace průměrného výstupního optického výkonu je založena na měření proudu monitorovací diodou. Neumožňuje však modulaci budícího proudu laserové diody.

**ADN2870** - je obvod určený pro modulaci vláknových laserů optických komunikací, umožňuje modulační frekvence v rozsahu od 50 Mbps do 3,3 Gbps. Modulační proud je ale pouze 90mA a bias proud maximálně 100mA.

**ADN2871** - je obvod s podobnými parametry jako předchozí typ, s tím rozdílem, že má zjednodušenou regulační smyčku budícího proudu. To umožnuje modulační frekvence až do 4,25 Gbps

**ONET1141L** - je obvod pro vysokorychlostní optické spoje s datovou propustností od 1 Gbps až do 11,3 Gbps. Zajímavým parametrem je bias proud laserové diody, který může být až 145mA. Obvod ale předpokládá speciální konstrukci laserové diody **electroabsorptive modulated laser (EML)** a i proto je udáván maximální modulační rozsah v napěťovém měřítku 2,0 Vpp Single-Ended.

**iC-HB** - obvod trojnásobného spínače pro laserové diody. Umožňuje spínat špičkově proudy do 300mA na jeden kanál, nebo v kontinuálním režimu reguluje proud do 65mA na jeden kanál. Obsahuje ochranné obvody proti přepětí a budící proudy je možné nastavit napětím na řídících vstupech. Maximální modulační frekvence je 155MHz.

**iC-HG** je šestikanálový budič laserových diod, umožňující modulaci celkovým proudem až 3A (po paralelním spojení všech kanálů). Modulační frekvence je až 200MHz. Má LVDS i TTL spouštěcí vstupy a možnost provozu na napětí až do 12V pro buzení modrých laserových diod.

**iC-HK** dvojitý spínač laserových diod, s řídícími proudy 150mA kontinuálně pro každý kanál a 700mA špičkový obvod se chová jako napěťově řízený zdroj proudu. Umožňuje spínání o šířce pásma 155MHz.

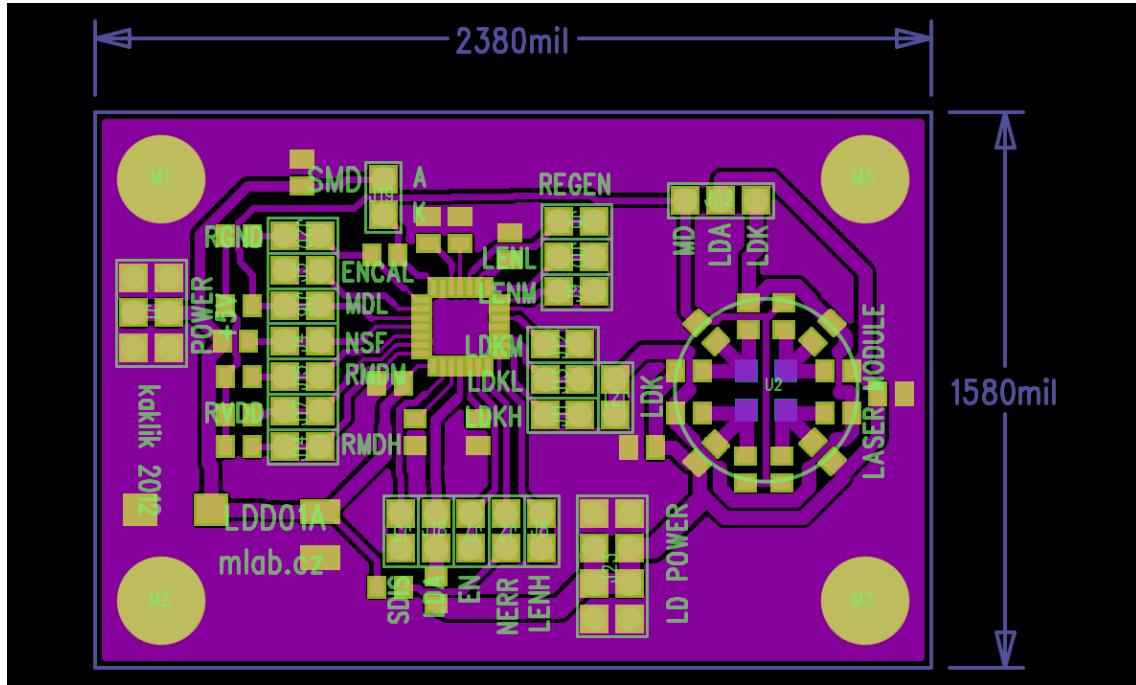
**iC-NZ** je univerzální budič pro spínání laserových diod o šířce pásma 155MHz obsahuje zpětnou vazbu z monitorovací diody. A navíc má i vstup pro externí kontrolní monitorovací diodu sloužící k zajištění detekce poškození laseru, nebo naopak k jeho ochraně před přetížením. Pracovní bod laserové diody se nastavuje na základě předefinovaného proudu monitorovací diodou. Obsahuje tři nezávisle spínatelné kanály každý s kontinuálním proudem 100mA a 700mA špičkový proud [7].

Z těchto integrovaných obvodů jsem jako nevhodnější vybral obvod iC-NZ díky svým vyhovujícím výkonovým parametry a bezpečnostním funkcím. Nevýhodou volby tohoto obvodu může ale v budoucnu být absence symetrických LVDS vstupů pro rychlé spínání a předpoklad použití monitorovací diody v laseru.

Na základě údajů z katalogového listu výrobce jsem navrhl univerzální modul pro testování modulů v laserovém dálkoměru. Zapojení je zvoleno tak, aby umožnilo konstrukci všech typů laserových měřičů vzdálenosti, jejichž principy byly zmíněny v úvodní kapitole. Tento modul je navíc technicky kompatibilní s otevřenou stavebnicí MLAB, díky čemuž je možné jeho využití i k jiným účelům než pouze jako laserový dálkoměr. Modul je navíc koncipován tak, aby jej bylo možné v budoucnu využít k přímému spínání laserových diod generujících i jiné vhodné vlnové délky. Například pro více-frekvenční LIDAR, jehož možnosti měření jsou ještě rozsáhlejší.

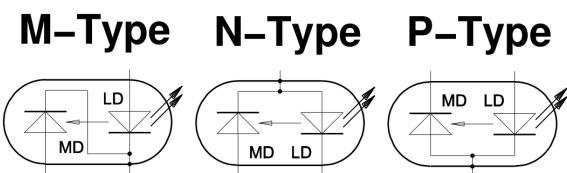
Stavebnice MLAB již obsahuje TDC modul GP201A [24], který je určený k přesnému měření časových intervalů s vysokým rozlišením. A laserový vysílačový LDD01A

modul je proto k němu logickým komplementem. Schéma zkonstruovaného pulzního budiče je uvedeno v příloze B. Jednotlivé vrstvy plošného spoje jsou pak součástí přílohy C. Plošný spoj modulu je navržen tak, aby umožnil přímé osazení laserovým modulem s odebranou původní elektronikou. Laserová dioda je zaletována přímo do plošného spoje a tělo modulu je kvůli lepší mechanické stabilitě přilepeno k plošnému spoji modulu 3.13.



Obrázek 3.13: Návrh plošného spoje pulzního budiče LDD01A

Modul má s ohledem na možný další vývoj laserových diod možnost zapojit diody s různými typy konfigurace vývodů z pouzdra. Nejběžnější konfigurace vývodů laserové a monitorovací diody jsou znázorněny na obrázku (3.14).



Obrázek 3.14: Běžné konfigurace vnitřního zapojení polovodičových laserů [7]

## 3.6 Diskuse dosažených výsledků

### 3.6.1 Dosažené parametry vysílače

Bylo zjištěno a ověřeno, že DPSSFD moduly používané v laserových ukazovátkách lze opakováně a definovaným postupem uvést do stavu, kdy dochází k autonomnímu generování krátkých šumových impulzů s délkou v oblasti stovek nanosekund. Samotný tvar impulzu ale záleží na konkrétním typu konstrukce laserového modulu. Mezi identickými typy modulů ale průběh nevykazuje znatelnou kusovou variabilitu. Tento výsledek může být užitečný například k laboratornímu testování některých experimentálních senzorů. Je ale třeba pro daný experiment vybrat vhodný modul.

### 3.6.2 Možnosti dalšího vývoje

Způsob modifikace laserového ukazovátka do podoby vhodné pro laserový dálkoměr byl v průběhu práce prozkoumán již dostatečně. Avšak pro další vývoj zařízení jsou možnosti stále rozsáhlé. Některé předpokládané koncepční problémy jsou diskutovány v následujících odstavcích.

#### Zapouzdření vysílače

Konstrukce vhodného obalu pro celé zařízení bude problametickou úlohou pro skutečnou realizaci, neboť je vzhledem k aplikaci potřebné, aby konstrukce nemohla být poškozena, nebo vyřazena z funkce povětrnostními vlivy. Zvláště problematické mohou být sníh, nebo námraza na optických komponentech, které bude třeba řešit buď aktivním vyhříváním výstupních čoček a nebo mechanickou závěrkou, případně pohyblivou hlavicí podobnou přístroji MRAKOMĚR 2 [25]. Současné komerční ceilometry mají před optikou šikmě vyhřívané sklo a případně jsou vybaveny aktivním ofukováním.

#### Aktivní stabilizace teploty

Vzhledem k tomu, že pro správnou funkci polovodičové diody je kritická její provozní teplota, bylo by vhodné zařízení vybavit systémem s aktivní regulací provozní teploty laseru. Stávající způsob odvodu tepla chladičem je účinný pouze v prostředí s vhodným rozsahem teplot, které umožní ustálení tepelné rovnováhy, a tím i stabilizaci pracovního bodu laseru. Zároveň je známá závislost mezi provozní teplotou a životností diody, která odpovídá zhruba zdvojnásobení životnosti při redukci provozní teploty o  $10^{\circ}\text{C}$ . [17]

#### Kombinace s jinými přístroji

Vzhledem ke koncepčnímu řešení prototypu, který je konstruován modulárně z dílů OpenSource stavebnice MLAB a navržený řídící modul laserové diody tuto konцепci doplňuje, je možnost připojení nebo modifikace zařízení pro jiné účely velice přímočará. Ve většině případů bude stačit vyměnit některý z modulů za modul vhodnější pro konkrétní aplikaci.

Lze tak například snadno realizovat elektroniku laserového dálkoměru, která může s řídícím systémem dalekohledu komunikovat po různých typech komunikačních rozhraní, například: RS232, RS485, CAN, USB, Ethernet.

## Bezpečnost vysílače

Bezpečnost provozu vysílače je komplexním parametrem, který je ovlivněn mnoha dříve zmíněnými vlastnostmi. Nejpřímější vliv má však průřez, energie a divergence svazku, tedy hustota energie v průřezu svazku, která není konstantní v celém měřícím rozsahu a s rostoucí vzdáleností značně klesá. Pokud budeme vycházet z dříve realizovaných konstrukcí laserových dálkoměrů pro atmosférická měření, tak nejmenší ověřená potřebná energie v jednom impulzu se pohybuje okolo  $0,5\mu\text{J}/100\text{ns}$ . Norma povoluje **MPE**  $0,75\mu\text{J}/\text{cm}^2$ . Z toho vyplývá, že pro lidské oko je při tomto výkonu a původním uspořádání (kapitola 3.1.3) nebezpečná zóna do vzdálenosti  $<61,5\text{m}$  od vysílače.

Rešením tohoto problému může být rekolimace svazku do většího průřezu hned na výstupu vysílače. Částečně lze ale předpokládat, že bezpečnosti provozu vysílače napomůže i fakt, že generovaná vlnová délka je ve viditelné oblasti světla a stopa svazku ve vzdachu je navíc dobře viditelná, a tudíž se nejedná o skryté nebezpečí, avšak uvažovaná aplikace vysílače patří z hlediska legislativních bezpečnostních podmínek k nejproblematičtějším. Svazek je totiž vyzařovaný svisle vzhůru a měření bude prováděno hlavně v noci, což znamená za největšího průměru očních zornic a od obsluhy nelze reálně očekávat využití ochranných brýlí. Navíc je pravděpodobná interakce s letovým provozem nad měřičem.

# Kapitola 4

## Závěr

Byla prozkoumána konstrukce běžně dostupných diodově čerpaných modulů používaných v laserových ukazovátkách a zjištěny jejich parametry, které byly vzhledem k jejich dostupnosti uznány jako zajímavé pro konstrukci vysílače pro laserový dálkoměr. Následně proto byla řešena úloha konstrukce vhodného řídícího obvodu pro čerpací laserovou diodu modulu.

Výsledkem práce jsou dva prototypy laserového vysílače vhodného pro další experimentální využití. Jednodušším prototypem je varianta s regulovatelným proudovým zdrojem, která vytváří impulzy samovolným kmitáním laseru. A dále sofistikovanější univerzální modul pro řízení laserových diod, který umožňuje generovat pulzy řízeným způsobem, nebo případně provozovat laser v pracovním bodě samovolného kmitání. Přínosem druhého prototypu je, že poskytuje možnost realizovat zařízení pro laserové měření vzdálenosti založené i na jiných principech, než je měření doby šíření. Výstupní energie druhého z prototypů by podle předpokladů měla být dostatečná pro noční detekci srážkově potenciální oblačnosti ve výškách menších než 1km nad přístrojem. Pro reálnou aplikaci vysílače a realizaci kompletního dálkoměru bude třeba druhý prototyp doplnit o vhodný detektor, kolimační optiku a patřičně zakrytovat.

# Literatura

- [1] J. Pehkonen and J. Kostamovaara, “A cmos front end for a laser rangefinder with resonance-based timing discrimination,” 2009.
- [2] Wikiversity, “Lofting technology — wikiversity.” [http://en.wikiversity.org/w/index.php?title=Lofting\\_technology&oldid=920605](http://en.wikiversity.org/w/index.php?title=Lofting_technology&oldid=920605), 2012. [Online; accessed 7-July-2012].
- [3] “Laser pointer, in wikipedia, the free encyclopedia.” [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laser\\_pointer&oldid=494827196](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laser_pointer&oldid=494827196). [Online]. [cit. 2012-05-28].
- [4] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, vol. 1. Springer, fifth revised and updated edition ed., 1999.
- [5] “Geniune new wish 5mw green laser module (5v).” <http://www.dealextreme.com/p/geniune-new-wish-5mw-green-laser-module-5v-10094>. [Online]. [cit. 2011-10-26].
- [6] “20mw 532nm green laser module (3v 11.9mm).” <http://www.dealextreme.com/p/20mw-532nm-green-laser-module-3v-11-9mm-26887>. [Online]. [cit. 2011-10-26].
- [7] iC Haus GmbH, “ic-nz fail-safe laser diode driver,” tech. rep., iC-Haus Germany, 2007.
- [8] I. Procházka, “Optical methods for atmospheric monitoring and enviromental sensing,” Tech. Rep. 3, Czech Technical University in Prague, 1999.
- [9] “National operational hydrologic and remote sensing center.” <http://www.noahrsc.nws.gov/technology/avhrr3a/avhrr3a.htm>. [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [10] Wikipedia, “Lasers and aviation safety — wikipedia, the free encyclopedia.” [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lasers\\_and\\_aviation\\_safety&oldid=496696885](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lasers_and_aviation_safety&oldid=496696885), 2012. [Online; accessed 4-July-2012].
- [11] “Osram set for green diode ramp in 2012.” <http://optics.org/news/1/7/17>. [Online]. [cit. 2012-06-27].

- [12] A. Owyoung, G. R. Hadley, P. Esherick, R. L. Schmitt, and L. A. Rahn, “Gain switching of a monolithic single-frequency laser-diode-excited nd:yaglaser,” *OPTICS LETTERS*, 1985.
- [13] M. Kákona and M. Janás, “MrakomĚr 4.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/MRAKOMER4>. MLAB, [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [14] G. Jon, M. Michael, S. Ron, W. Jeffrey, and D. R. Snyder, “Miniature laser rangefinders and laser altimeters,” 2010.
- [15] J. Kölbla, M. Fröschla, A. Seedsmana, and P. Sperberb, “Near-infrared laser range finder, using khz repetition rate,” 2008.
- [16] “Adl-80y1tl algaas infrared laser diode,” tech. rep., LASER components, 2005.
- [17] U. Malzahn, “Driving diode lasers is staraightforward,” *EuroPhotonics*, no. 04, pp. 22–23, 2004.
- [18] Centronic Limited, *Silicon Photodetector Series 5T*, 2005.
- [19] M. Horkel, “Modul napájecího zdroje 1.25v až 5.5v.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/LM108601A>, 2007. MLAB.
- [20] <http://www.mlab.cz>. MLAB project, [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [21] J. Kákona, “Vykony operacni zesilovac.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/OZpower01A>, 2008. MLAB.
- [22] M. Janás, “Dvojitý operační zesilovač.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/OZDUAL02B>, 2011. MLAB.
- [23] iC Haus GmbH, “Discrete vs. integrated,” tech. rep., iC-Haus Germany, 2007.
- [24] J. Kákona, “Základní časově digitální převodník gp201a.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/GP201A>. MLAB, [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [25] M. Kákona, “MrakomĚr 2.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/MRAKOMER2>. MLAB, [Online]. [cit. 2012-06-27].

# Příloha A

## Slovník

**AFM** Atomic force microscopy.

**APD** Avalanche photodiode.

**CCD** Charge-coupled device.

**CMOS** Complementary metal–oxide–semiconductor.

**DPSS** Diode-pumped solid-state LASER.

**DPSSFD** Diode pumped solid state frequency-doubled LASER.

**FOV** field of view.

**FWHM** Full width at half maximum.

**KDP** Potassium dideuterium phosphate ( $KD_2PO_4$ ).

**KTnP** Potassium titanyl phosphate ( $KTiOPO_4$ ).

**LASER** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

**LD** LASER Diode.

**LIDAR** Light Detection And Ranging.

**LRF** Laser rangefinder.

**MD** Monitor Diode.

**MPE** maximum permissible exposure.

**Nd:YAG** Neodymium-doped yttrium aluminum garnet ( $Nd : Y_3Al_5O_12$ ).

**Nd:YLF** Neodymium-doped yttrium lithium fluoride ( $LiYF_4$ ).

**Nd:YVO<sub>4</sub>** Neodymium-doped yttrium orthovanadate (Nd:YVO<sub>4</sub>).

**PCW** Pulsed Continuous Wave.

**S/N** Signal-to-noise ratio.

**SMA** SubMiniature version A.

**TDC** Time to digital converter.

**TDR** Time-domain reflectometry.

**ToF** Time of flight.

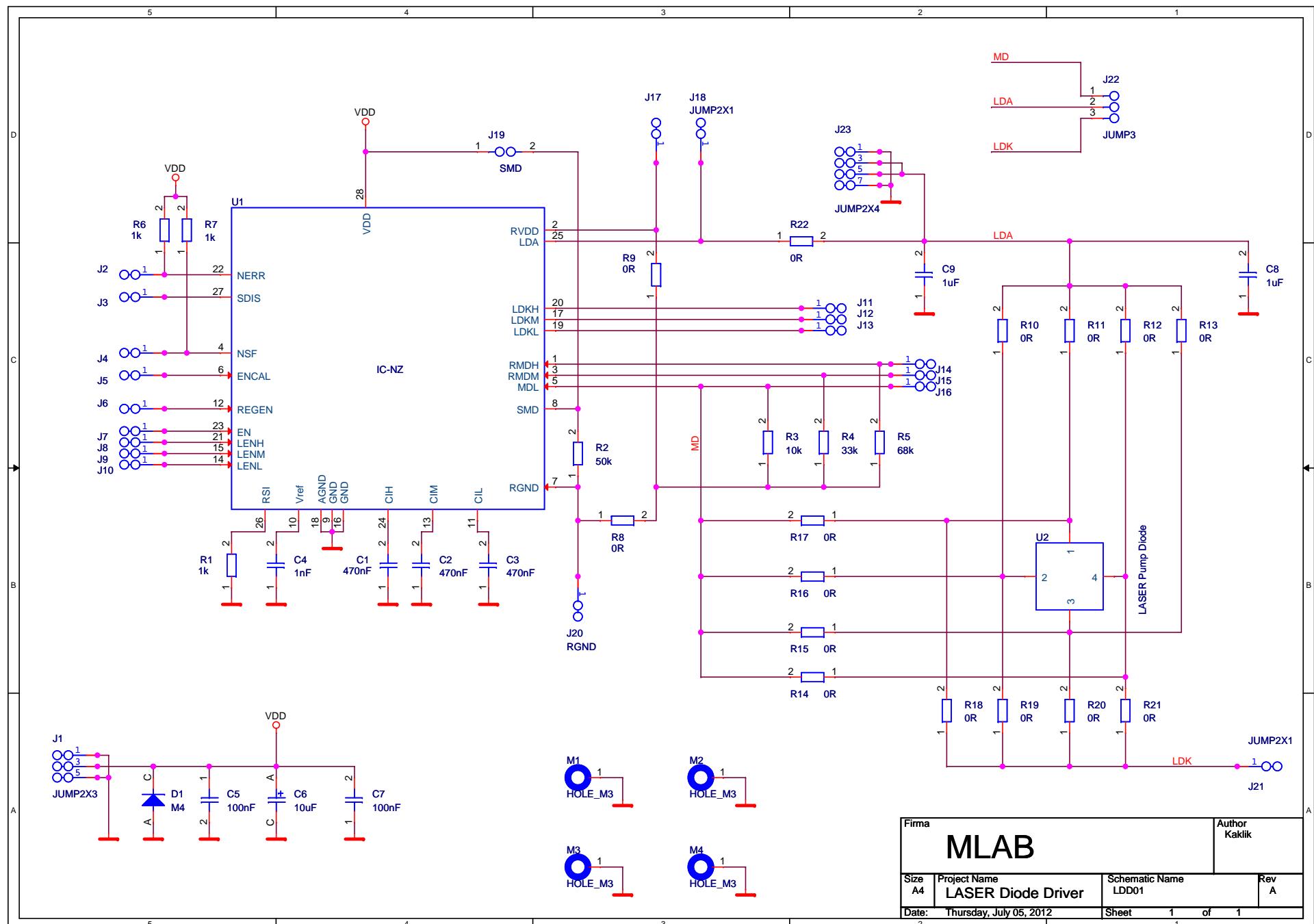
**UAV** unmanned aerial vehicle.

**UV** Ultraviolet (10 nm to 400 nm).

**VCSEL** Vertical Cavity Surface Emitting Laser.

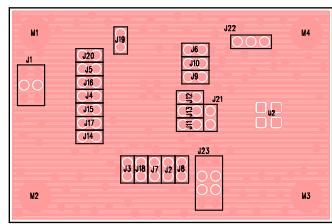
## Příloha B

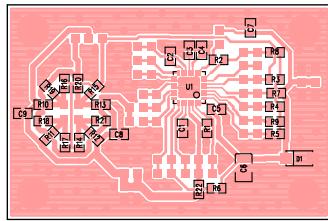
### Schéma pulzního budiče

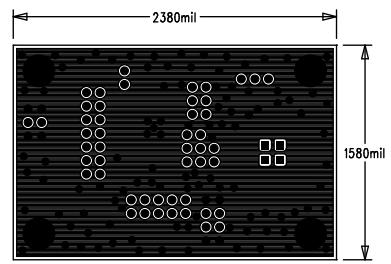


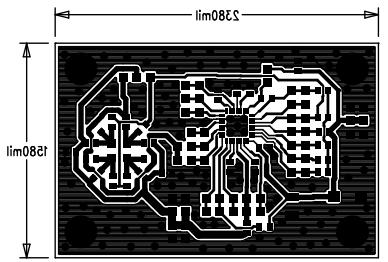
## Příloha C

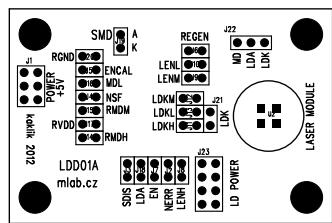
Plošný spoj navrženého pulzního budiče

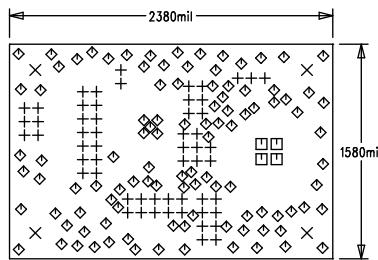












SIZE	QTY	SYM	PLATED	TOL
35	57	+	YES	+/-0.0
125.98	4	X	YES	+/-0.0
23.62	4	□	YES	+/-0.0
22	103	◇	YES	+/-0.0

## Příloha D

### Obsah přiloženého CD

```
readme.txt ..... description of CD contents
src ..... source code for this thesis in LATEX
laserovy_vysilac.pdf ..... thesis in PDF
photo ..... photos of prototype development
data ..... measured data
```