

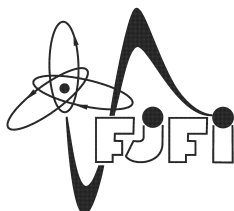
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra fyzikální elektroniky

Bakalářská práce
Jakub Kákona

Praha – 2012

Vzor titulní strany na pevných deskách

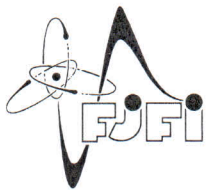
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra fyzikální elektroniky



Vysílač pro laserový dálkoměr

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 K á k o n 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 budicí 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 Blažej, Ph.D. dále školiteli Prof. Ing. Ivanu Procházkovi, DrSc. A také mým rodičům a přátelům za inspiraci a trpělivost.

Konstrukce prototypů laserového vysílače byla pak 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 pevnotlátkového laserového modulu generujícího výstupní záření 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.

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

Abstract

This thesis is aimed on investigation of use an diode pumped solid state frequency doubled laser module as LASER transmitter for miniature laser range finder. This module is widely used in green laser pointers. Because of this it is easily available in oposition to semiconductor laser diodes for this wavelenghts.

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

Obsah

1	Úvod	2
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	7
1.2.4	Divergence a parametry svazku ve vzdálené zóně	8
1.2.5	Nejistota spouštění (Trigger jitter)	8
2	Rozbor problému	9
2.1	Druhy modulovatelných laserů	9
2.1.1	Polovodičový diodový LASER	9
2.1.2	Pevnolátkové lasery	9
2.1.3	Pevnolátkový diodově čerpaný LASER s generací druhé harmonické	10
2.2	Metody generace krátkých impulzů	10
2.2.1	Volně běžící pulzní režim (PCW)	10
2.2.2	Q spínání	10
2.2.3	Synchronizace módů (Mode-locking)	10
2.2.4	Spínání ziskem (gain switching)	11
2.3	Fyzikální model laserového vysílače	11
2.3.1	Rychlostní rovnice	11
2.3.2	Relaxační kmity pevnolátkových laserů	12
2.3.3	Spínání impulzu ziskem	13
2.3.4	Generace druhé harmonické	13
2.4	Dosavadní řešení problému	14
2.4.1	Jiné ToF dálkoměry	14
3	Řešení	15
3.1	Konstrukce DPSSFD modulu	15
3.1.1	Čerpací dioda	16
3.1.2	Aktivní prostředí a konverzní krystal	16
3.1.3	Kolimace výstupního svazku a výstupní IR filtr	17

3.1.4	Původní regulační obvod	18
3.2	Parametry laserových modulů	20
3.2.1	Běžné provozní hodnoty	20
3.2.2	Rozdíly mezi laserovými moduly	21
3.3	Měření krátkých světelných impulzů	21
3.4	Relaxační kmity DPSSFD modulu	22
3.5	Vlastní Řídící elektronika	24
3.5.1	Stabilizovaný zdroj proudu	24
3.5.2	Pulzní budič laserové diody	26
3.6	Diskuse dosažených výsledků	30
3.6.1	Dosažené parametry vysílače	30
3.6.2	Možnosti dalšího vývoje	30
4	Závěr	32
	Literatura	33
A	Slovník	34
B	Schéma pulzního budiče	36
C	Plošný spoj navrženého pulzního budiče	38
D	Obsah přiloženého CD	45

Seznam obrázků

1.1	Zjednodušené blokové schéma ToF LRF	4
1.2	Závislost transmisivity čisté atmosféry na vlnové délce záření	6
1.3	Běžná závislost reflektance vodních oblaků v atmosféře. Barevnými křivkami je pak znázorněna reflektance sněhu.	7
3.1	Typická konstrukce diodově čerpaného pevnolátkového laseru používaného, jako zelené laserové ukazovátko. [1]	15
3.2	Výstupní výkon typického Nd:YVO ₄ laseru v závislosti na teplotě diody a vlnové délce [2].	17
3.3	Promítané stopy svazků ve vzdálenosti 20m od modulu. Vlevo modul 5mW, napravo varianta 20mW. Měřítka vpravo dole má rozměr 0,5mrad.	18
3.4	Měření prováděné s původním regulačním obvodem.	19
3.5	Použité testovací DPSSFD moduly 5mW (vlevo) a 20mW (vpravo).	20
3.6	Schéma detektoru s PIN diodou.	21
3.7	Realizovaný detektor časového průběhu záření	22
3.8	Závislost intenzity výstupního záření na proudu čerpací diodou.	23
3.9	Časové průběhy výstupních impulzů laseru pro 20mW modul (typ s větší výstupní hlavou M10) s vhodně nastaveným pracovním bodem.	24
3.10	Průběh výstupních impulzů v případě použití 5mW verze modulu (typ s menší výstupní hlavou M8).	25
3.11	Aparatura použitá pro měření intenzity optického výstupu v závislosti na budícím proudu.	25
3.12	Koncepce použití navrženého pulzního budiče.	26
3.13	Návrh plošného spoje pulsního budiče LDD01A	29
3.14	Běžné typy konfigurace vnitřního zapojení polovodičových laserů	29

Seznam tabulek

3.1	Parametry laserového modulu s původním regulátorem	20
3.2	Parametry laserového modulu napájeného zkonstruovaným zdrojem proudu.	26

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 řídicí 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 zkonstruovat vhodný řídicí obvod čerpací diody modulu, tak aby bylo možné modul využít pro zvolenou aplikaci.

V poslední části budou změřeny dosažené parametry

Cílem použití 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 řídicího 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, není potřebné aby laserový vysílač umožňoval měření na delší vzdálenosti.

Kapitola 1

Úvod

Laserový dálkoměr je zařízení, které je schopno měřit vzdálenost objektu odražejícího záření optických vlnových délek. Tyto objekty mohou být velmi různého charakteru a dálkoměr je pak v principu schopen měřit pevné, kapalně nebo i 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 změření nějaké 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 odraženého fotonu **ToF**.

1.1.1 Triangulační metoda

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

Tato metoda, je 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 použita cylindrická čočka, která svazek rozšíří do roviny ve směru řezu předmětu (laser-sheet). V tomto uspořádání pak

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

Ke snímání obrazu je v tomto případě obvykle využíván maticový snímač - **CCD**, nebo **CMOS** sensor. A 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 několika metrů.

1.1.2 Fázová metoda

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

Výsledkem měření tedy je fázové zpoždění odpovídající určité vzdálenosti. Očekávaným problémem této metody ale je fakt, že způsob modulace přímo ovlivňuje měřený rozsah tj. měření vzdálenosti je možné pouze na rozsahu jedné periody modulace. A vzhledem k tomu, že měřená vzdálenost není obvykle dopředu známa, tak je potřeba aby vysílač umožňoval mnoho způsobů modulace vysílaného svazku.

Další komplikací pak je požadavek na dobrou reflexivitu měřeného předmětu, protože fázový detektor potřebuje ke své správné funkci dostatečný odstup signálu od šumu.

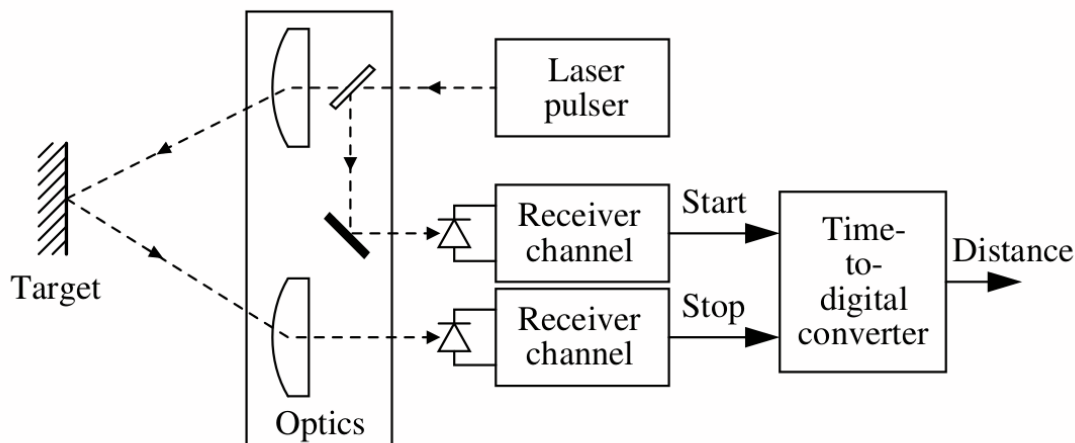
Metoda se proto obvykle využívá pro měření vzdáleností v malém rozsahu řádově desítky metrů a méně. Typickým příkladem využití této měřicí metody jsou kapesní stavební dálkoměry používané jako náhrada klasických svinovacích metrů.

Tato fázová metoda má ještě další variaci a to tu, že jako modulaci signálu je možné v určitých podmínkách využít samotnou vlnovou strukturu světla. A vysílaný i od předmětu odražený svazek nechat interferovat na maticovém snímači. Výsledná interference je pak velmi citlivá na vzájemný fázový posun obou svazků ve zlomcích vlnové délky. Tím lze dosáhnout velmi velkého prostorového rozlišení ve smyslu měření změn vzdálenosti až na atomární úroveň tedy desítky až jednotky nanometrů. Tento princip je pak využíván ve specializovaných aplikacích, jako jsou velmi přesné obráběcí automaty, AFM mikroskopy, detektory gravitačních vln, nebo špionážní 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 vygenerujeme vysílačem a následně po odrazu od měřeného objektu detekujeme v detektoru. Změřená doba šíření pak odpovídá dvojnásobku vzdálenosti mezi vysílačem a měřeným předmětem.

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



Obrázek 1.1: Zjednodušené blokové schéma ToF LRF

Kde c je rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu, n je index lomu prostředí (pro atmosférická měření většinou zanedbáván jako $n \approx 1$) a t je změřená doba šíření. Veličina d je pak vzdálenost předmětu, kterou potřebujeme změřit.

Při měření se tak předpokládá homogenní prostředí ve kterém se světlo šíří, nebo alespoň prostředí o nějaké známé efektivní hodnotě indexu lomu. Pokud dále předpokládáme prostředí bez rozptylu a absorpce. S tím, že celý laserový signál zasáhne kompaktní měřený objekt, tak zpětně odražený počet fotonů může být přibližně vyjádřen vztahem (1.2).

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

Kde

N - počet detekovaných fotoelektronů.

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

η - koeficient celkové optické účinnosti přístroje.

R - vzdálenost cíle.

r - označuje efektivní reflektivitu cíle.

Dále vzhledem k tomu, že pro větší vzdálenosti je pravděpodobnost zachycení zpětně odraženého fotonu malá, tak jsou využívány různé techniky pro zlepšení poměru S/N . Často jde o metody statického zpracování nebo o 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 (díky pokročilým možnostem zpracování) vysoké nároky na odstup signálu od šumu. Běžně se proto využívá například pro měření a následné výpočty korekcí drah družic, nebo i

měření podélných parametrů optických komunikačních vláken, kde je metoda známa, jako **TDR**. Možnosti aplikace metody měření doby šíření jsou tak rozsáhlé, že z ní vychází i další přístroje, 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 detektoru. Velkou výhodou tohoto přístupu je, že i z jediného výstřelu laseru je možné získat poměrně značné množství informací. Problémem ale je 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 detektorem jsou detekovány jednotlivé odražené fotony, což umožňuje podstatně snížit nároky na špičkový výstupní výkon i na sběrnou plochu detektoru. Nevýhodou ale je 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) [3].

Tato práce je proto zaměřena právě na tento 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.

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)** detektoru. Její další úlohou je také ochrana vnitřních částí přístroje před vnějším prostředím. Proto musí mít vnější optická plocha často speciální konstrukci.

Laser pulser - Zdroj měřicího impulsu splňující požadavky popsané v následující sekci 1.2.

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

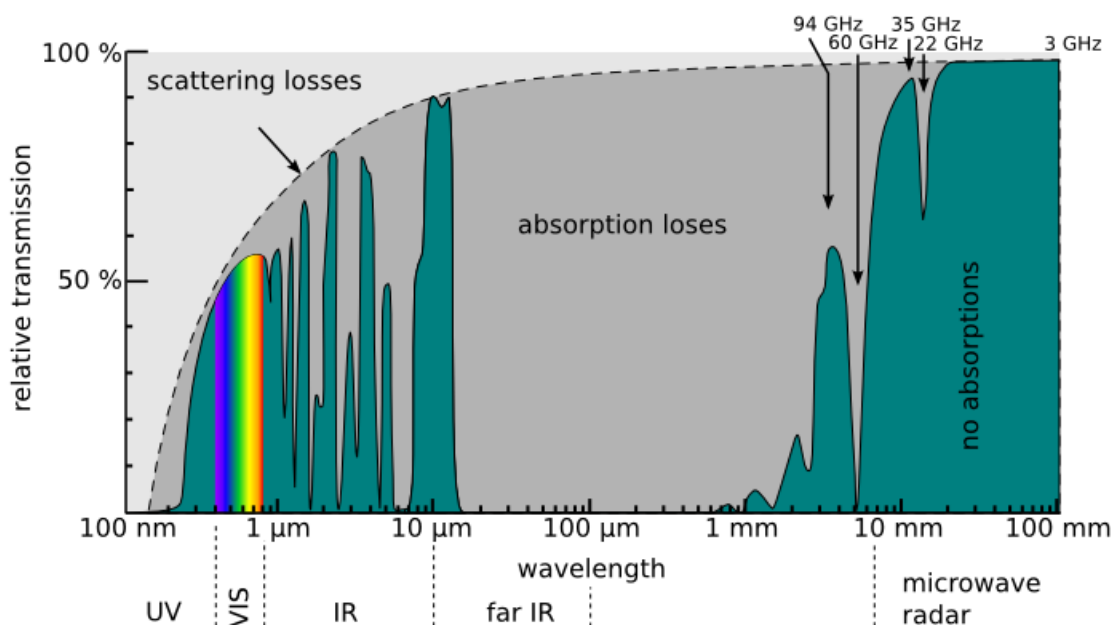
Time to digital converter - Elektronický obvod, umožňující přesné měření časového intervalu. Jeho přesnost vedle délky vyslaného laserového impulsu rozhoduje o výsledném rozlišení přístroje. V principu jede o digitální čítač. Pro přesné měření jsou ale využívány speciální **TDC** integrované obvody. 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, tak se následující kapitola týká parametrů vysílače určeného k měření oblačnosti.

1.2.1 Vlnová délka záření

Vhodná vlnová délka výstupního záření laserového vysílače závisí na mnoha faktorech, jako je například absorpce 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 dáno 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

Ovšem 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. Tak je vhodné použít střední vlnovou délku optického záření, ze zelené oblasti spektra. Která relativně dobře prochází čistou atmosférou.

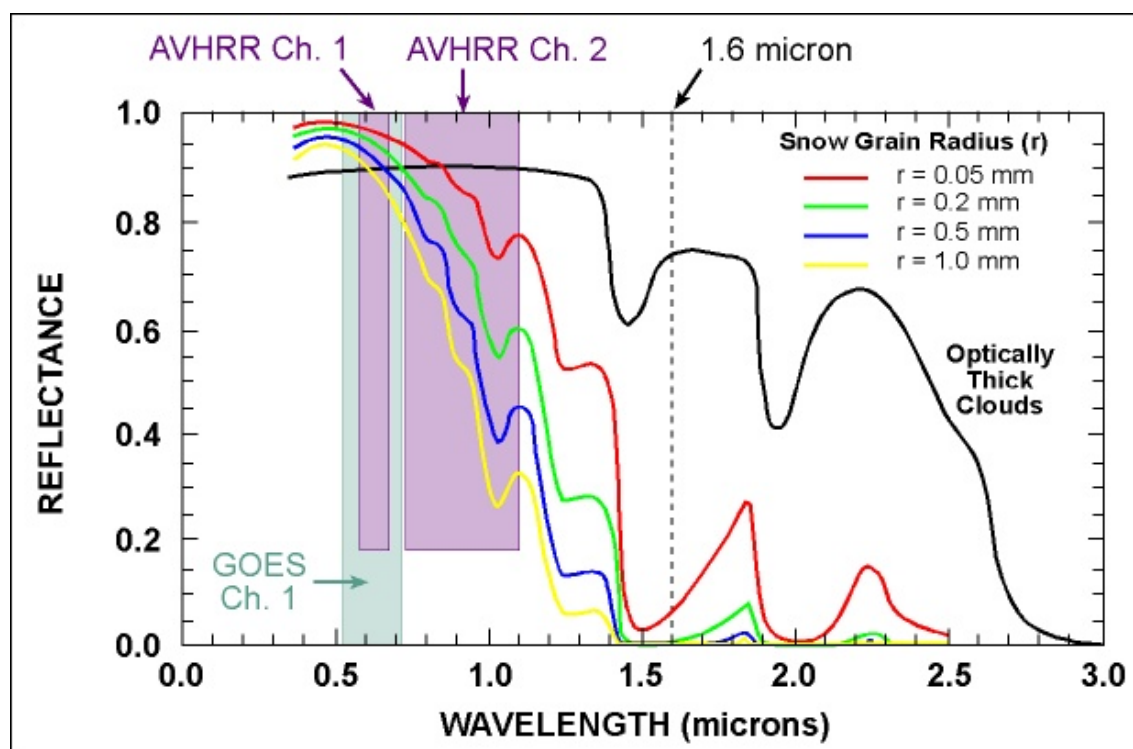
$$\kappa_R(\lambda) = K \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.3)$$

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

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

Pro měření oblačnosti (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 [4] 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, tak od laserového vysílače budeme 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 jeden. A v případě dlouhého impulzu 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 lepší, než řádově metry. Proto stačí od laserového vysílače požadovat délky pulzů kratší, než stovky nanosekund.

1.2.3 Energie impulzu

Energie výstupního impulzu je ideálně co největší, aby bylo dosaženo vysoké pravděpodobnosti zachycení některého zpětně odraženého fotonu v každém měření. Ale vzhledem k tomu, že je třeba brát ohled i na bezpečnostní rizika takového systému, tak je potřeba

se držet bezpečných úrovní pro intenzity elektromagnetického záření, které předepisuje norma IEC/EN 60825-1.

Která pro vlnovou délku 532nm a impulz délky 100ns specifikuje **maximum permissible exposure (MPE)** jako $0,75\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

Vysílač tedy musí být konstruovaný tak, aby výstupní svazek (který bude v našem případě směřovat 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 vygenerování 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 také vlivem konečného rozměru výstupní apertury i nenulová rozbíhavost svazku. Vzhledem k tomu, že svazek je takto modifikován primárně difrakčními jevy, tak je smysluplné zkoumat profil svazku hlavně ve vzdálené zóně. Avšak existuje difrakční limit minimální divergence svazku na apertuře konečného průměru, který lze vyjádřit vztahem 1.4.

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

θ - divergence svazku.

λ - 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, tak počet odražených fotonů není 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.

1.2.5 Nejistota spuštění (Trigger jitter)

Nejistota spuštění 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, pokud laser generuje impulsy se známým zpožděním, neboť pak není nutné měřit přesnou dobu, kdy vygenerovaný balík fotonů ve skutečnosti opustil vysílač. Vzhledem k plánovanému použití vysílače, je asi rozumné požadovat aby jitter spuštění 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 tohoto stavu je možné dosáhnout.

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 délkách 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.[5] Zatím ale nedosahují potřebných výstupních energií a navíc jejich pořizovací cena je stále dosti vysoká.

2.1.2 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkový laser byl vůbec prvním spuštěným laserem ¹, jejich čerpání bylo klasicky prováděno zábleskem výbojky. A 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 ke kontaminaci plynu 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 prostředí využito **Nd:YAG**, nebo **Nd:YVO₄**. A v laserových dálkoměrech mají nadále největší zastoupení díky svým kompaktním rozměrům a odolnosti.

¹Rubínový laser, Maiman, 1960

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 nelineárním optickým 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, jak se pokusit generovat krátký laserový puls. Princip spočívá v pulzně modulovaném čerpání aktivního prostředí. Laser se pak chová tak, že v době kdy je čerpání pod prahovou úrovní, tak 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 impulzů o intenzitě vyšší, než je ustálený kontinuální režim do kterého tyto pulzy postupně konvergují. Po skončení čerpacího pulzu (sestupná hrana) dochází k postupnému exponenciálnímu snižování výstupní intenzity vlivem nenulové doby života fotonů v rezonátoru.

Toto chování je důsledkem, rychlostních rovnic popsaných 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 tak, aby nemohlo dojít ke stimulované emisi fotonů, 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 impulsu s vysokou intenzitou záření a energií koncentrovanou v čase. Délka takto vygenerovaného impulsu se pohybuje v řádu ns.

2.2.3 Synchronizace módů (Mode-locking)

Mode-locking je dalším vylepšením Q spínaného režimu a generace krátkého impulsu 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 délkou.

2.2.4 Spínání ziskem (gain switching)

Poslední známou možností, jak se pokusit laserem generovat krátký světelný impulz je spínání ziskem. Jeho princip je v nastavení pracovního bodu laseru tak, aby úroveň čerpání byla dlouhodobě 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 pod prahovou úroveň. Výsledkem je vygenerování jednoho laserového impulsu, který je sice delší, než v případě Q spínání, ale 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. Ale vzhledem, tomu, že jde převážně o materiálové a těžko měřitelné jevy je přesné modelování obtížné, přesto bud nastíněn postup, který může tento problém řešit.

2.3.1 Rychlostní rovnice

Rychlostní rovnice jsou základním matematickým popisem dějů v laserovém systému. Jde o soustavu diferenciálních rovnic, která popisuje inverzi 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:YVO₄** nabývají tvaru 2.1, 2.2.

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

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c \sigma \phi n - \frac{\phi}{\tau_c} + S_1. \quad (2.2)$$

Význam jednotlivých proměnných je následující:

n_2 - .

n_0 - .

W_p - rychlost čerpání do vyšších kvantových stavů [s^{-1}].

t - .

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

σ - .

ϕ - hustota generovaných fotonů v prostředí.

n - .

τ_c - .

τ_f - doba života elektronu na horní laserové hladině τ_{12} .

S_1 - odpovídá počáteční úrovni šumu vlivem spontánní emise fotonů ϕ .

2.3.2 Relaxační kmity pevnolátkových laserů

Relaxační oscilace jsou hlavním důvodem, proč řada pevnolátkových laserů negeneruje ve volně běžícím režimu čistý a stabilní výstup. Důvod tohoto chování je součástí principu generace laserového záření. V případě, že do termodynamicky ustáleného aktivního prostředí je 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 vzhledem k tomu, že inverze populace dosáhla podstatně vyšší hodnoty, než v ustáleném stavu, tak i tok fotonů v rezonátoru dosáhne vyšších hodnot. Protože ale vysoká hustota fotonů v rezonátoru znamená rychlou depopulaci excitovaných hladin (podstatně vyšší, než je rychlost čerpání), tak 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 opakované generování stejných, nebo podobných světelných impulzů na výstupu laseru.

K exaktnímu popisu tohoto jevu je opět 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.

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

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

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

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

Relaxační oscilace jsou tedy fundamentálním jevem, který je předpovězený rychlostními rovnicemi. Ve značném množství aplikací ale jde o jev nežádoucí a proto se pokusy o jejich aktivní tlumení datují již do roku 1962 [2]. K tomuto účelu byly využívány elementy v podobě Kerrový 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 i využít ke generaci krátkých impulzů s vyšším výkonem, než by bylo možné ve volně běžícím režimu. Protože v případě, že je laser čerpán z jiného pulzního laseru, tak 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, tak dojde k propadu inverze populace hladin hluboko po 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.

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 v tomto případě k tak silnému nárůstu výstupního výkonu oproti výkonu čerpání. A 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/cm²) [2]. Splnění takové podmínky mimo laserový rezonátor není jednoduché, proto se u **DPSSFD** modulů umísťuje 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. A výstupní zrcadlo pak naopak má ideální propustnost pro zkonvertované záření 532nm.

Účinnost 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 $K = 2Z^3\omega_1 d_{eff}$

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

P_{ω} - Výkon budící vlny

ω_1 - Úhlová frekvence budící vlny

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

l - délka konverzního krystalu

A - plocha budícího svazku

Δk - 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) Δk který je značně závislý na teplotě. [2]

2.4 Dosavadní řešení problému

Existuje již mnoho typů meteorologických přístrojů určených k měření výšky základny oblačnosti. Například jsou to laserové ceilometry ² Vaisala CL51 a CL31 oba využívají 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 impulsu 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 1uJ/cm² při délce impulsu 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 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 teplot 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 [6] má FOV 40° 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.

2.4.1 Jiné ToF dálkoměry

Značné množství podobných konstrukcí využívá ke generaci laserového impulsu Q-spínaný pevnolátkový laser, nebo pulzně buzenou polovodičovou diodu.

Například jeden z nejmenších komerčních dálkoměrů [7] určený pro využití v UAV systémech generuje impuls o délce 15ns FWHM pomocí polovodičového systému Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL), elektronický pulzer využívá lavinového průrazu tranzistoru a generuje špičkové proudy až 100A. Špičkový výkon laserového pulzu pak je 64W v prostorovém úhlu 14° FWHM.

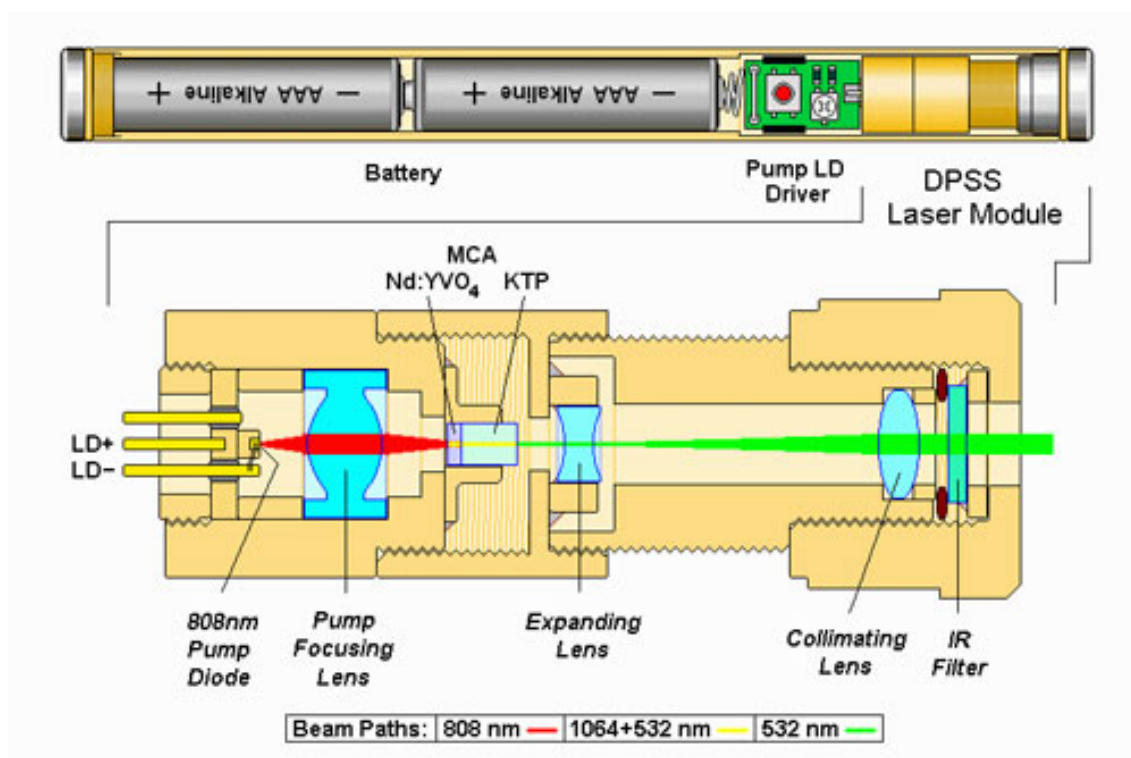
²První optické ceilometry využívaly triangulační metodu měření vzdálenosti, kde byla oblačnost nasvětlována výkonným reflektorem.

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. [1]

3.1.1 Čerpací dioda

Polovodičová čerpací dioda, která je na obrázku (3.1) v levo 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 [8]. Tyto dvě diody mají běžně společný jeden vývod. A protože každá z diod má interně dva vývody, tak 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 **LASER Diode (LD)**.

Referenční zpětnovazebná fotodioda se ale nedá použít ke kalibračním účelům, protože takto indikovaný výkon má mezi jednotlivými várkami laserů rozptýl až jeden řád [9]. 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 $0,25\text{nm}/^\circ\text{C}$. Což 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, 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 přeskokováním vyzařovaných vlnových délek [9].

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 některých konstrukcí čočka, která upravuje záření vycházející z laserové diody, tak aby bylo možné jej navázat skrz dielektrické zrcadlo na čele krystalu do rezonátoru a čerpat jím aktivní prostředí **Nd:YVO₄**. V testovaných modulech ale čočka byla vynechána a vazba čerpací diody s rezonátorem je tvořena pouze přímým kontaktem aktivního krystalu a čela diody.

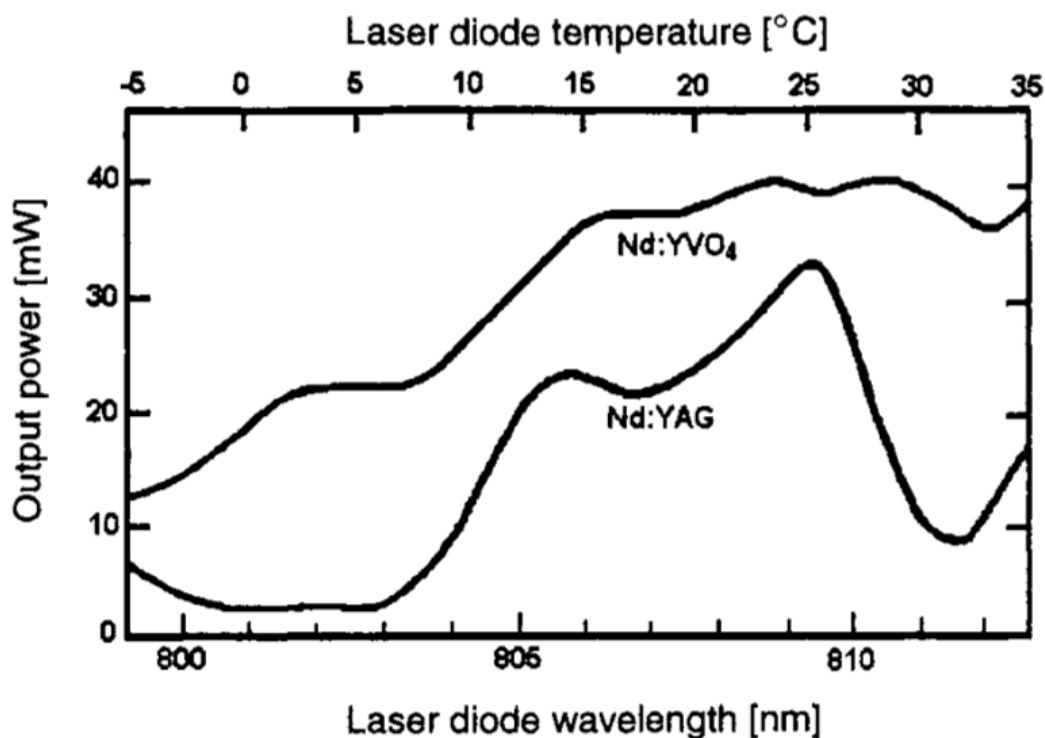
3.1.2 Aktivní prostředí a konverzní krystal

Aktivním prostředím v laserovém modulu je obvykle krystal **Nd:YVO₄** 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 ukazovatek může být konverzní krystal **KTP** oddělený a aktivní prostředí je pak tvořeno samostatným krystalem **Nd:YAG** nebo výjimečně **Nd:YLF** [1]

Použití aktivního prostředí **Nd:YVO₄** je však výhodné díky většímu účinnému průřezu stimulované emise, který je 5x větší, než u **Nd:YAG** zároveň má také širší absorpční čáru, takže modul může pracovat při větším rozsahu teplot. I přes tyto parametry a fakt, že materiál **Nd:YVO₄** byl objeven už v roce 1966, byly velkou překážkou jeho

širokého použití problémy s růstem krystalů dostatečné velikosti vhodné pro výbojkové 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 [2].



Obrázek 3.2: Výstupní výkon typického Nd:YVO₄ laseru v závislosti na teplotě diody a vlnové délce [2].

Ze známých rozměrů krystalu je také možné se pokusit o odhad bilance extrahovatelné energie z ideálně načerpaného krystalu. Samotné aktivní prostředí z bloku 1x1x3mm v DPSSFD modulu tvoří přibližně 1/3 tedy 1mm³. Pokud předpokládáme 1% dopaci. Tak 1mm³ 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 extrahovatelná z krystalu Nd:YAG nebo Nd:YVO₄ je ~ 26 [mJ].

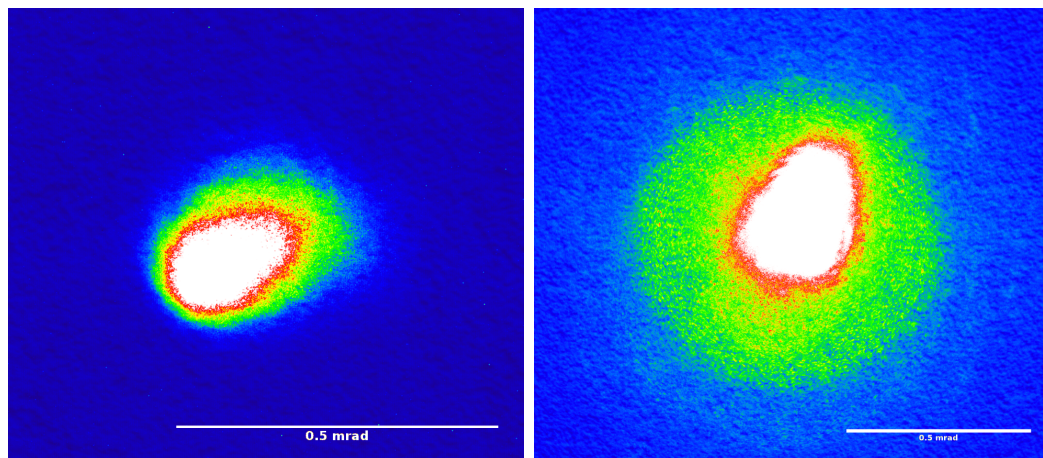
$$E_k = E_{pho}N = \frac{hc}{\lambda}N \quad (3.1)$$

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 výstup laseru ještě z bezpečnostních důvodů zařazen IR filtr, který odstraní případné zbytky čerpacího záření, nebo nezkonvertované záření 1064nm vycházející z dutiny rezonátoru.



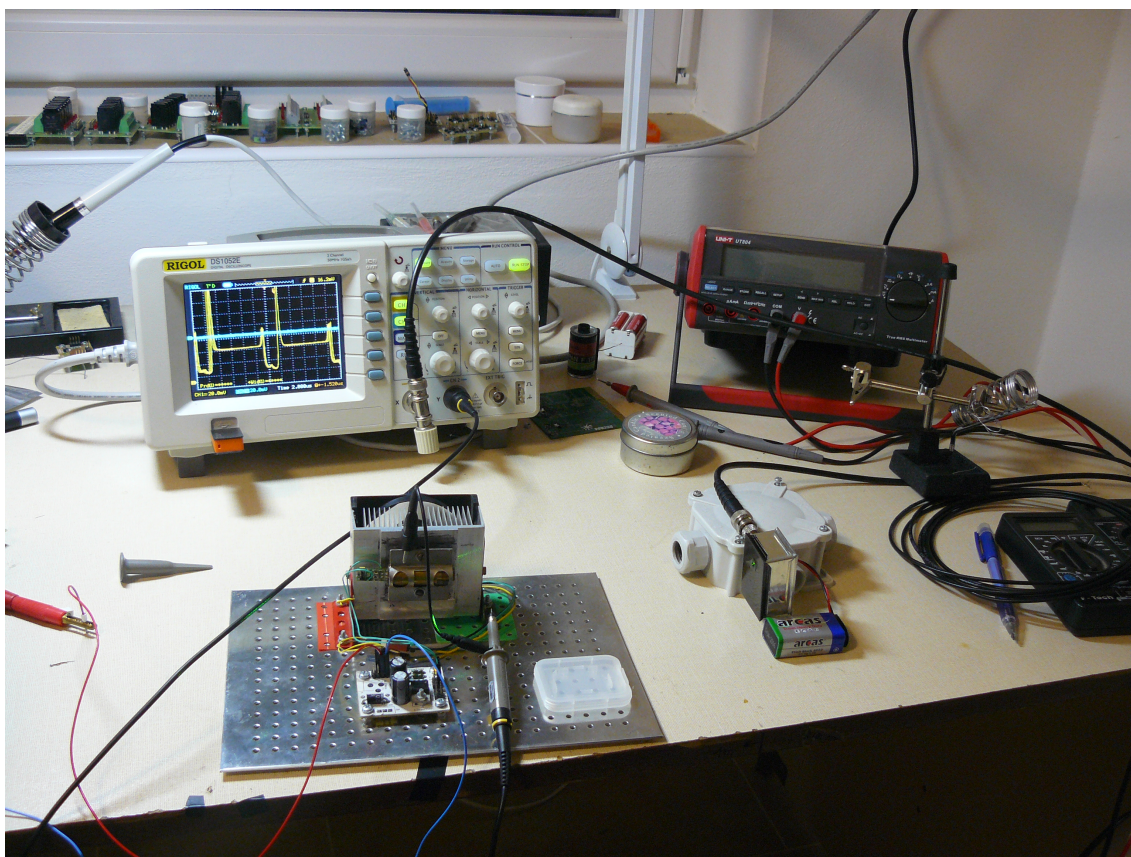
Obrázek 3.3: Promítané stopy svazků ve vzdálenosti 20m od modulu. Vlevo modul 5mW, napravo varianta 20mW. Měřítka vpravo dole má rozměr 0,5mrad.

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 rozbíhavosti svazků. Naměřené hodnoty 0,2x0,3mrad a 0,15x0,2 lze považovat spíše za horní hranice rozbíhavosti pro tovární nastavení modulů, neboť modul byl před měřením několikrát rozebrán z důvodu průzkumu jeho obsahu, což mělo negativní vliv na přesnost jeho kolimace. Nejlepší naměřená hodnota 0,15mrad je však v podstatě shodná s teoretickým difrakčním limitem odvozeným z rozměrů laseru viz. kapitola 3.2.

Tyto hodnoty divergence lze tak pro uvažovanou aplikaci považovat za více než dostatečné, neboť i největší stopa svazku o divergenci 0,5 mrad bude mít ve výšce 1km nad detektorem rozměr pouze 0,5m což je zaručeně méně, než velikost základny kumulu, či kumulonimbu, který by mohl potenciálně poškodit vybavení observatoře.

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, tak není možné v zapnutém stavu provozovat ukazovátka 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 $(11,9 \pm 0,1)$ 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 ale pouze 2,3mm (změřeno posuvným měřítkem).

Z těchto parametrů lze tak podle výrazu 1.4 určit difrakčně limitovanou minimální divergenci svazku, která je $\sim 0,15$ mrad.



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

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.

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 Záleží na teplotě a typu modulu

3.2.2 Rozdíly mezi laserovými moduly

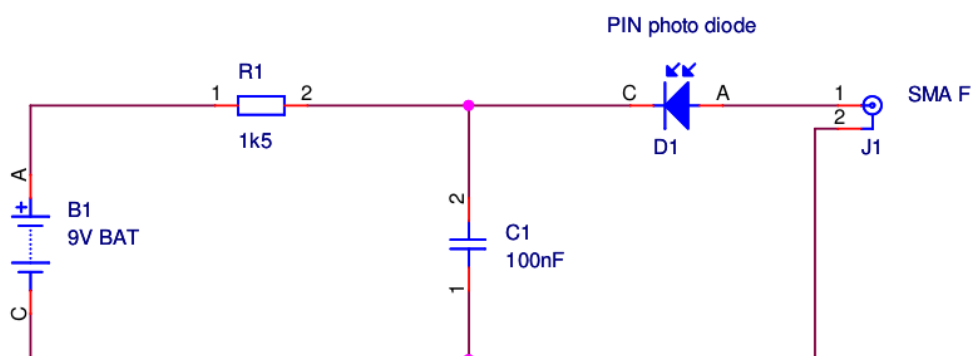
Hlavní rozdíl mezi moduly je výrobcem udávaný kontinuální výstupní výkon modulu a pracovní napětí, které je u 20mW modulu udáváno jako 3V a u 5mW modulu 5V. U testovaných levných laserových modulů nebyl zjištěn žádný výrazný konstrukční rozdíl. Pouze výkonnější z modulů (20mW) má masivnější materiál 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 řídicí 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

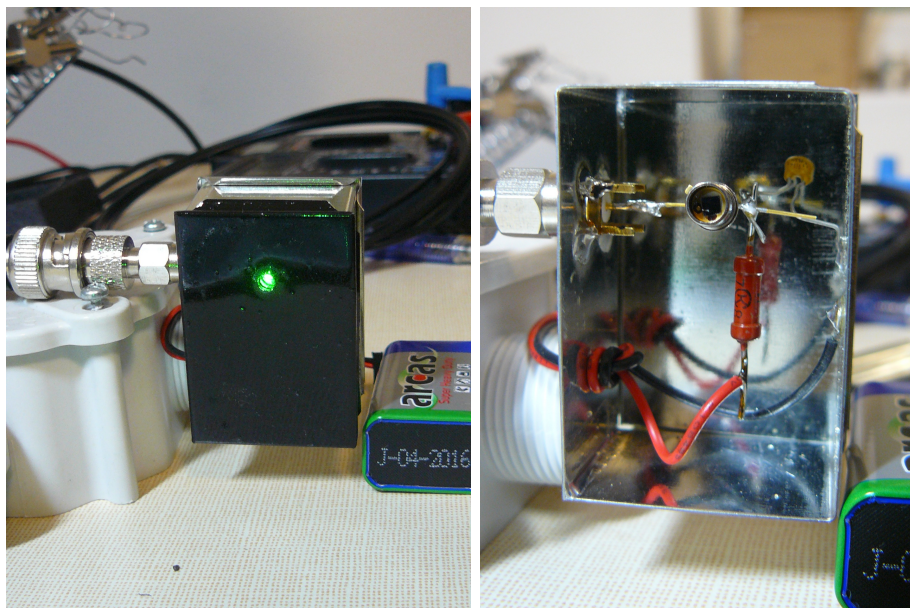
K tomu, aby bylo možné kvantifikovat dosažené parametry laserového vysílače, je potřeba umět změřit i výstupní časový průběh intenzity záření v impulzu. K tomuto účelu se obvykle využívá zapojení předepjaté PIN fotodiody, která pak díky svojí nízké parazitní kapacitě pracuje jako vhodný snímač pro velmi rychlé děje. Pro účely měření byl jeden takový snímač zkonstruován. Jeho zapojení je znázorněno na obrázku 3.6. Použitá PIN dioda je CENTRONIC - OSD1-5T s kapacitou přechodu 7pF a aktivní plochou 1mm² [10].



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.



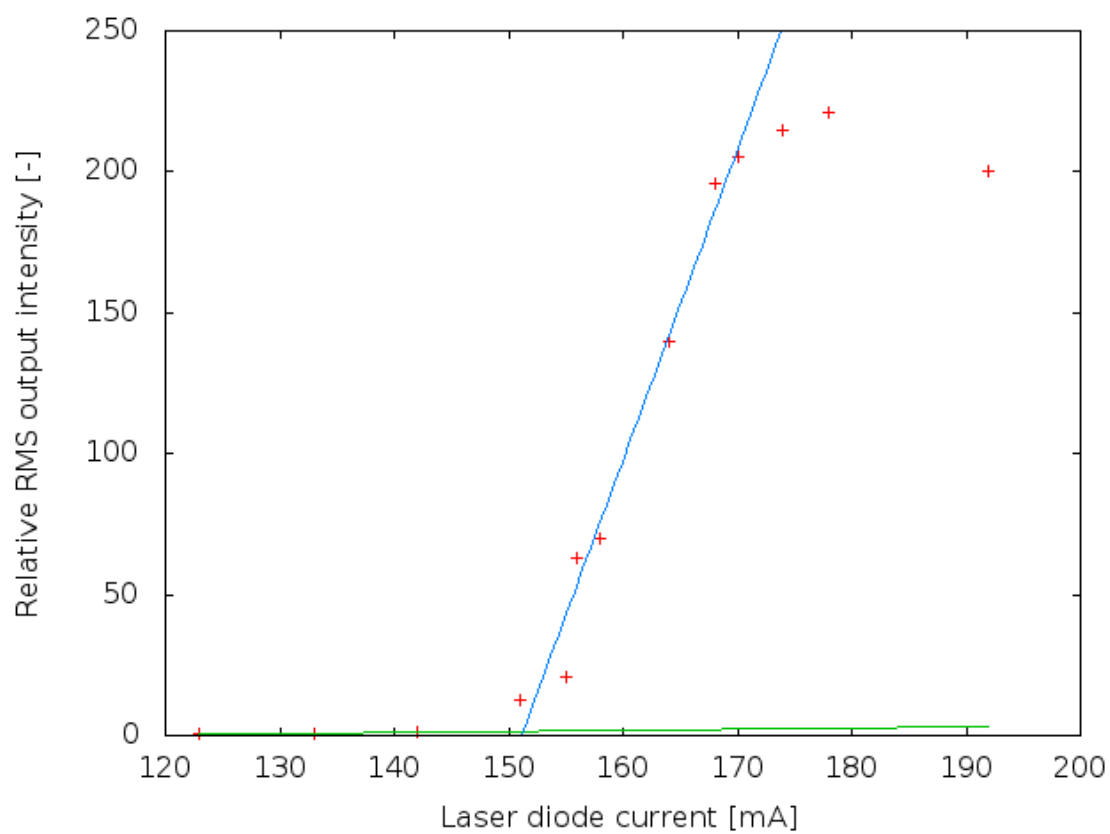
Obrázek 3.7: Realizovaný detektor časového průběhu záření

3.4 Relaxační kmitý 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 pulzní modulace dosahuje 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 takovýmto 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 vyneseno naměřený průběh střední intenzity záření jednoho z modulů (měřeno PIN detektorem a vypočítáno z plochy signálu). Při vyšších proudech je partný pokles výstupní intenzity způsobený pravděpodobně zahřátím modulu a poklesem účinnosti.

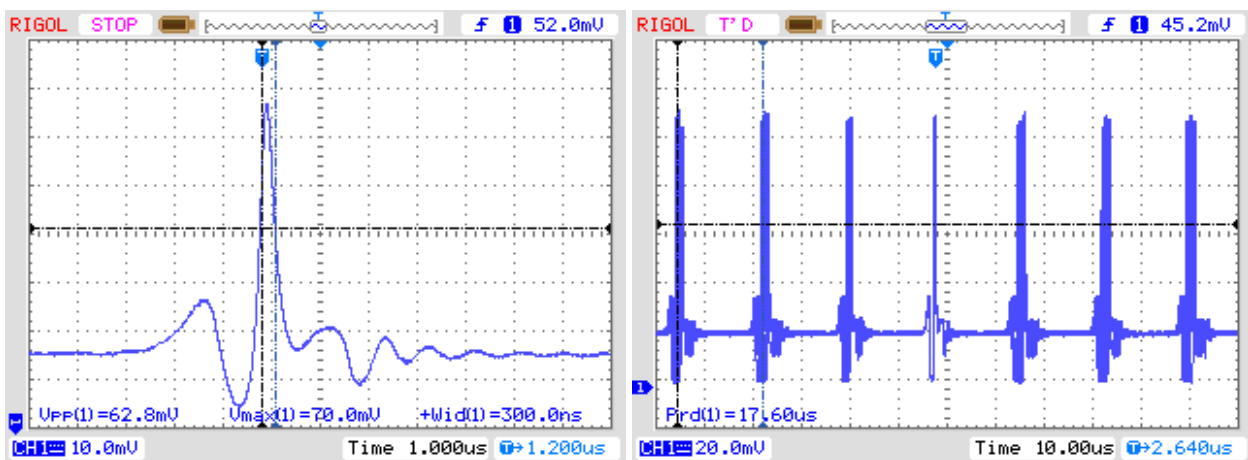
Jednou z uvažovaných konstrukčních variant vysílače pro laserový dálkoměr bylo využití těchto autonomních kmitů laseru, jako zdroje vhodných laserových impulzů. Ovšem vzhledem k nestabilitě tohoto režimu by tato možnost vyžadovala stabilizaci tohoto



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

stavu regulačním obvodem, čehož by bylo asi možné dosáhnout Fourierovým rozkladem výstupního signálu a analýzou frekvenčních komponent. Ale vzhledem k faktu, že průběhy generované jednotlivými typy laserů nejsou naprosto identické, tak by byla 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 56kHz. 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.

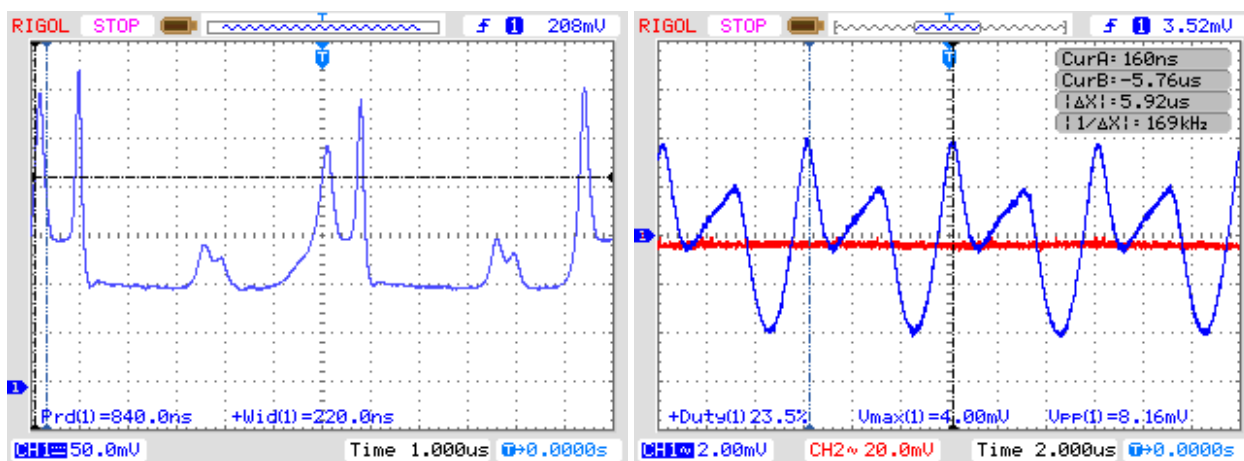
Autonomně generovaných relaxačních kmitů bylo možné dosáhnout již s původním regulačním obvodem. Avšak vzhledem k tomu, že ten je výkonově poddimenzován, tak nebylo možné modul takovým způsobem používat delší dobu.

3.5 Vlastní Řídící elektronika

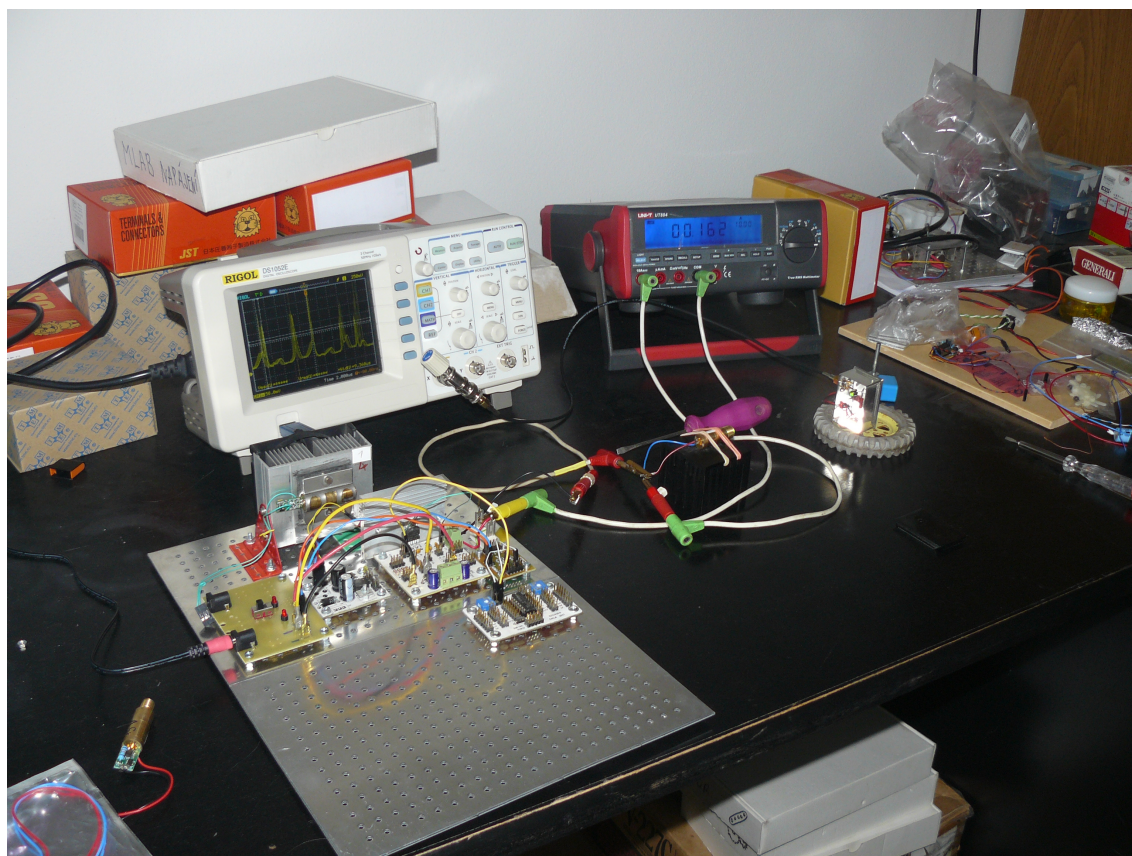
Aby bylo možné uvažovat o použití těchto laserových modulů, jako laserového dálkoměru je z výše popsaných důvodů nutné změnit způsob regulace laserového systému.

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



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



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

použit výkonový operační zesilovač L165. Proud je stabilizován udržováním napětového úbytku na měřicím odporu. Tato hodnota je nastavována odporovým děličem ze zdroje referenčního napětí LM431.

Na měřicím odporu je pak výstupem operačního zesilovače udržováno nastavené referenční napětí.

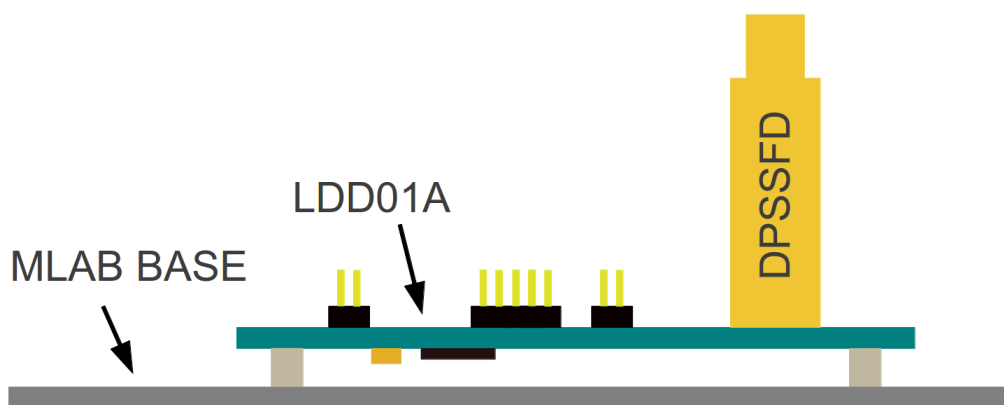
Celý proudový zdroj je zkonstruovaný z následujících modulů stavebnice MLAB: OZPOWER01A, OZdual01B,

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.

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

3.5.2 Pulzní budič laserové diody



Obrázek 3.12: Koncepce použití navrženého pulzního budiče.

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

Vzhledem k tomu, že od pulzního budiče jsou vyžadovány vysoké nároky na strmost proudových impulzů při proudech v rozsahu stovek mA, tak 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 [11].

Při návrhu tohoto typu budiče pro laserovou diodu bylo uvažováno o použití několika různých integrovaných obvodů. Jako velice perspektivní se zdály 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% střídání signálu a také často implementované automatické regulační a měřicí 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. Nedostatekem 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 umožňuje 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 napětovém měřítku 2.0Vpp Single-Ended.

iC-HB - obvod trojnásobného spínače pro laserové diody. Umožňuje spínat špičkové 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 řídicích 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 řídicími proudy 150mA kontinuálně pro každý kanál a 700mA špičkový obvod se chová, jako napětově 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 předdefinovaného proudu monitorovací diodou. Obsahuje tři nezávisle spínatelné kanály každý s kontinuálním proudem 100mA a 700mA špičkový proud.

Z těchto integrovaných obvodů byl jako nejvhodnější vybrán obvod iC-NZ díky svým vyhovujícím výkonovým parametrům 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 výrobce byl navržen univerzální modul pro testování laserových modulů. 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 laserový dálkoměr. Modul je navíc koncipován tak, aby bylo možné jej v budoucnu využít k přímému spínání laserových diod generujících jiné vlnové délky.

Stavebnice MLAB [12] již obsahuje TDC modul GP201A, 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.

Plošný spoje 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**.

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**).

3.6 Diskuse dosažených výsledků

3.6.1 Dosažené parametry vysílače

Bylo zjištěno a ověřeno, že DPSSFD moduly používané v laserových ukazovátkách lze opakovaně 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 například užitečný, k laboratornímu testování některých experimentálních senzorů. Je ale ovšem třeba vybrat vhodný modul pro daný experiment.

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 prolametickou úlohou pro skutečnou realizaci, neboť je vzhledem k aplikaci potřebné a by konstrukce nemohla být poškozena, nebo vyřazena z funkce povětrnostními vlivy. Zvláště problematické mohou být sníh, nebo námraza na optických komponentech. Kterou bude třeba řešit buď aktivním vyhříváním výstupních čoček a nebo mechanickou závěrkou, případně pohyblivou hlavicí podobnou přístroji MRAKOMĚR 2 ze zdroje.

Aktivní stabilizace teploty

Vzhledem k tomu, že pro správnou funkci polovodičové diody je kritická její provozní teplota. Tak by bylo vhodné zařízení vybavit systémem s aktivní regulací provozní teploty laseru, stávající stav konstantního 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°C . [9]

Kombinace s jinými přístroji

Vzhledem ke koncepčnímu řešení prototypu, který je konstruován modulárně z dílů OpenSource stavebnice MLAB a navržený řídicí modul laserové diody tuto koncepci doplňuje. Tak je možnost připojení, nebo modifikace zařízení pro jiné účely velice přímočará. A ve většině případů by mělo stačit vyměnit některý z modulů za modul vhodnější pro konkrétní aplikaci.

Lze tak například snadno implementovat elektroniku laserového dálkoměru, která může s řídicím systémem dalekohledu komunikovat po různých typech sběrnic, například: RS232, RS485, CAN, USB, Ethernet.

Bezpečnost vysílače

Bezpečnost provozu vysílače je komplexním parametrem, který je ovlivněn všemi výše zmíněnými vlastnostmi. Nejpřímější vliv má však energie a divergence svazku, tedy hustota energie v průřezu svazku, která není konstantní v celém měřicím rozsahu a s rostoucí vzdáleností značně klesá. Pokud budeme vycházet z dříve realizovaných konstrukcí laserových dálkoměrů pro atmosférická měření, tak potřebná energie v jednom impulzu se pohybuje okolo 0,5uJ/100ns. Což odpovídá špičkovému výkonu 5W.

Z toho vyplývá, že pro lidský zrak je problematická zóna do vzdálenosti X_m od vysílače. Existují sice speciální vlnové délky označované, jako Eye Safe okolo 1500nm, které neprocházejí rohovkou a tudíž, jsou částečně bezpečné pro oční sítnici. Ovšem tato vlnová délka není příliš vhodná pro detekci oblačnosti a navíc právní norma žádné skutečné Eye Safe vlnové délky nezná. Řešením tohoto problému může být rekolimace svazku do většího průměru hned na výstupu vysílače. Casteně lze ale předpokládat, že bezpečnosti provozu vysílače napomůže i fakt, že generovaná vlnová délka je ve viditelné oblasti světla a stopa svazku ve vzduchu je navíc dobře viditelná. A tudíž se nejedná o skryté nebezpečí avšak uvažovaná aplikace vysílače patří z hlediska bezpečnostních podmínek k nejproblematictější - svazek je vyzařovaný svisle vzhůru, měření bude prováděno hlavně v noci což znamená za největšího průměru očních zornic a od obsluhy nelze reálně očekávat využití ochranných brýlí.

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 řídicího obvodu pro čerpací laserovou diodu modulu.

Výsledkem práce jsou dva prototypy laserového vysílače vhodného pro další experimentální využití. Jednodušší varianta regulovatelného proudového zdroje, která vytváří impulzy samovolným kmitáním laseru. A sofistikovanější univerzální modul pro řízení laserových diod, který umonuje generovat pulsy řízením způsobem, nebo případně provozovat laser v pracovním bodě samovolného kmitání. Přínosem druhého prototypu také je, že poskytuje možnost realizovat zařízení pro laserové měření vzdálenosti, založené i na jiných principech, než je měření doby šíření. Výstupní energie obou prototypů by podle laboratorních měla být dostatečná pro detekci srážkově potenciální oblačnosti ve výškách menších, než 1km nad přístrojem. Pro reálnou aplikaci vysílače, a realizaci kompletního dálkoměru je třeba jej pouze doplnit o vhodný detektor a patřičně zakrytovat. Zadání práce bylo proto splněno v celém rozsahu.

Literatura

- [1] “Laser pointer, in wikipedia, the free encyclopedia.” http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laser_pointer&oldid=494827196. [Online]. [cit. 2012-05-28].
- [2] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, vol. 1. Springer, fifth revised and updated edition ed., 1999.
- [3] I. Procházka, “Optical methods for atmospheric monitoring and environmental sensing,” Tech. Rep. 3, Czech Technical University in Prague, 1999.
- [4] “National operational hydrologic and remote sensing center.” <http://www.nohrsc.nws.gov/technology/avhrr3a/avhrr3a.htm>. [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [5] “Osram set for green diode ramp in 2012.” <http://optics.org/news/1/7/17>. [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [6] “Mrakoměr 4.” <http://www.mlab.cz/PermaLink/MRAKOMER4>. [Online]. [cit. 2012-06-27].
- [7] R. S. J. W. D. R. S. Jon Geske, Michael MacDougal, “Miniature laser rangefinders and laser altimeters,” tech. rep., Aerius Photonics, 2010.
- [8] L. components, “Adl-80y1tl algaas infrared laser diode,” *datasheet*, 2005.
- [9] U. Malzahn, “Driving diode lasers is straightforward,” *EuroPhotonics*, no. 04, pp. 22–23, 2004.
- [10] Centronic Limited, *Silicon Photodetector Series 5T*, 2005.
- [11] iC Haus GmbH, “Discrete vs. integrated,” tech. rep., iC-Haus Germany, 2007.
- [12] “Mlab project.” <http://www.mlab.cz>. [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.

KDP Potassium dideuterium phosphate (KD_2PO_4).

KTP 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:YVO₄ Neodymium-doped yttrium orthovanadate ($Nd:YVO_4$).

PCW Pulsed Continuous Wave.

S/N Signal-to-noise ratio.

SMA SubMiniature version A.

TDC Time to digital converter.

TDR Time-domain reflectometry.

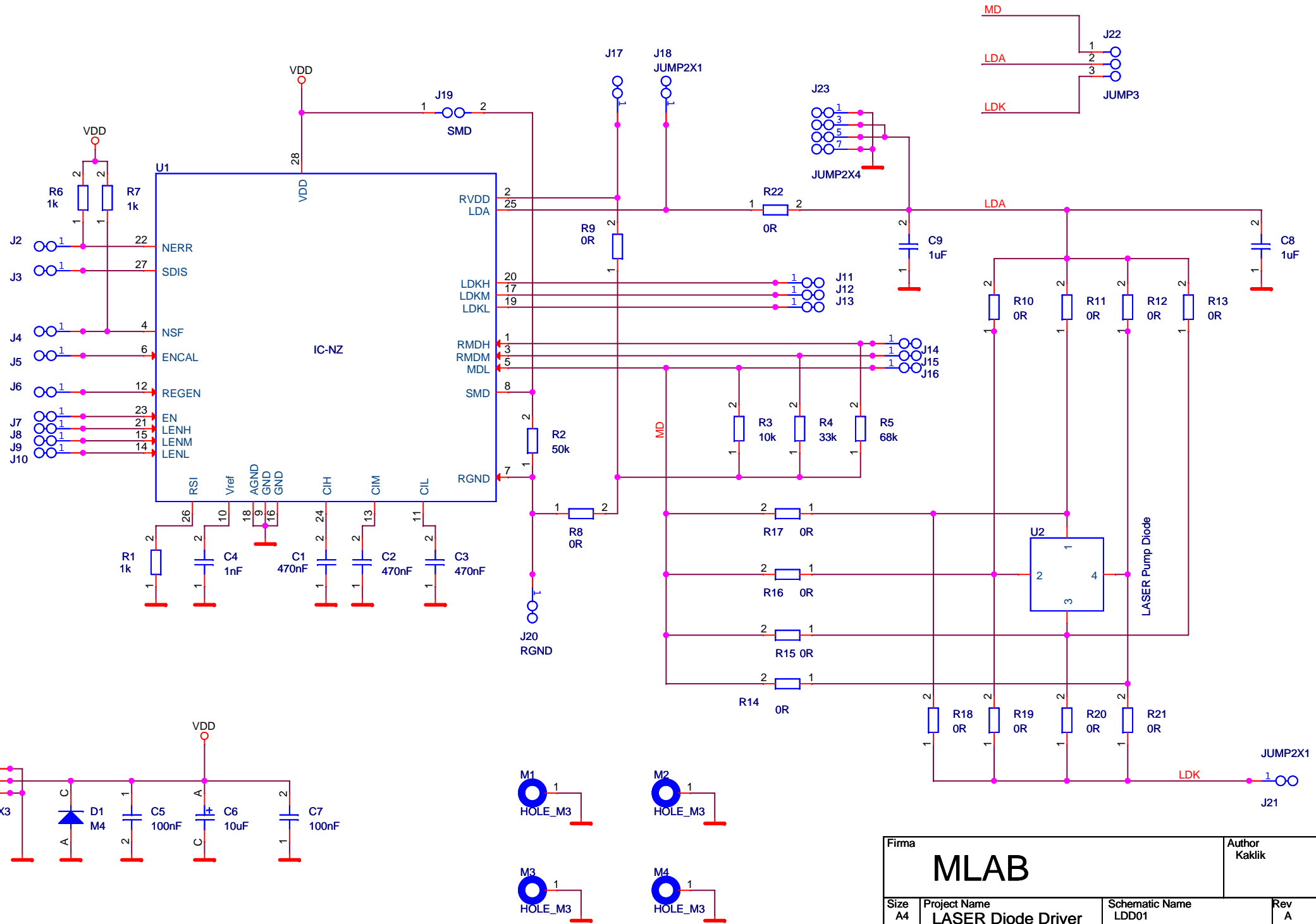
ToF Time of flight.

UAV unmanned aerial vehicle.

UV Ultraviolet (10 nm to 400 nm).

Příloha B

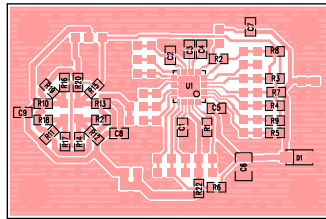
Schéma pulzního budiče

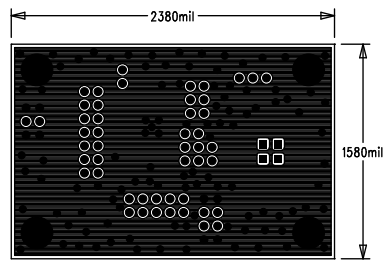


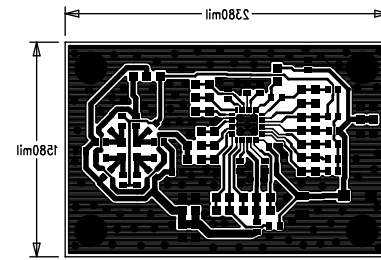
Firma		MLAB		Author Kaklik	
Size A4	Project Name LASER Diode Driver	Schematic Name LDD01	Rev A		
Date:	Tuesday, June 19, 2012	Sheet	1	of	1

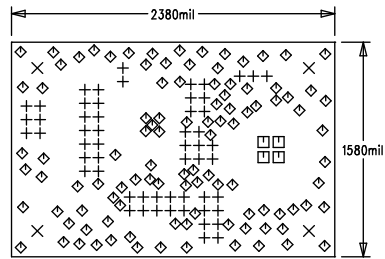
Příloha C

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
|   |_ thesis ..... source code for this thesis in LATEX
|_ text ..... compiled thesis
|   |_ thesis.pdf ..... thesis in PDF
|_ photo ..... photos of prototype development
```