

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
Jméno autora a rok ukončení práce taky na hřbetní straně

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: **Jméno školitele**
(Konzultant(i)): **Jména konzultantů**
Školní rok: **2011/2012**

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

Praha, xx.xx.2012

Podpis studenta
Jakub Kákona

Obsah

1	Zadání práce	5
2	Úvod	5
2.1	Principy měření vzdálenosti	5
2.1.1	Triangulační metoda	5
2.1.2	Fázová metoda	6
2.1.3	Měření doby letu (ToF)	6
3	Požadavky na pulsní laserový vysílač	7
3.1	Modelová aplikace	7
3.2	Vlnová délka záření	7
3.3	Délka výstupního světelného impulsu	8
3.4	Energie impulsu	8
3.5	Nejistota okamžiku sepnutí (jitter)	9
4	Druhy modulovatelných laserů	9
4.1	Polovodičový diodový LASER	9
4.2	Pevnolátkový diodově čerpaný LASER s generací druhé harmonické	9
5	Teoretické limity konstrukce	9
5.1	Metody generace krátkých impulsů	9
5.1.1	Q spínání	9
5.1.2	Synchronizace módu (Mode-locking)	10
5.1.3	Volně běžící pulzní režim (PCW)	10
5.1.4	Spínání ziskem (gain switching)	10
5.2	Numerický model laserového vysílače	10
5.2.1	Rychlostní rovnice	10
5.2.2	Generace druhé harmonické	10
5.2.3	Spínání impulsu ziskem	10
5.3	Zdroje ztrátového výkonu v DPSSFD	10
5.3.1	Účinnost čerpací diody	10
5.3.2	Konverzní účinnost aktivního prostředí	10
6	Dosavadní řešení problému	10
6.1	Jiné pulzní dálkoměry	10
6.2	Moderní laserové vysílače	10
7	Řešení laserového vysílače	10
7.1	Konstrukce DPSSFD modulu	10
7.1.1	Čerpací dioda	12
7.1.2	Optika	12
7.1.3	Původní "Regulační" obvod	12
7.2	Parametry laserových modulů	12
7.2.1	Běžné provozní hodnoty	12

7.2.2	Rozdíly mezi laserovými moduly	12
7.3	Měření krátkých světelných impulzů	12
8	Relaxační kmity LASERu	13
9	Vlastní Řídící elektronika	13
9.1	Stabilizovaný zdroj proudu	13
9.2	Pulsní budič laserové diody	13
10	Diskuse dosažených výsledků	13
10.1	Dosažené parametry vysílače	13
10.2	Možnosti dalšího vylepšení	13
10.2.1	Zapouzdření vysílače	13
10.2.2	Aktivní stabilizace teploty	13
10.2.3	Kombinace s jinými přístroji	14
11	Závěr	14

1 Zadání práce

2 Úvod

Laserový dálkoměr je zařízení, které je schopno měřit vzdálenost objektu odrážejícího záření optických vlnových délek. Tyto objekty mohou být velmi různého charakteru a dálkoměr je pak v principu schopen měřit pevné, kapalné 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.

2.1 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 - Time of Flight measurement).

2.1.1 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. 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.

2.1.2 Fázová metoda

U této metody je již vyžívána 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 odrazí 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. Předpokladatelným 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.

2.1.3 Měření doby letu (ToF)

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

$$d = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

Kde c je rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu, n je index lomu prostředí a t je změřená doba letu. 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. Zpětně zachycený výkon vyjadřuje rovnice 2.

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad (2)$$

Kde

P_t = transmitter power

!!DOPLNIT!!

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 (Time domain refractometry) Možnosti použití navíc nejsou omezeny pouze na klasické světelné vlnové délky, ale stejný princip lze uplatnit například i při použití rádiových vlnových délek, což by u předchozích metod nebylo možné vzhledem k problematické konstrukci elementů, jako jsou čočky, zrcadla, nebo maticové detektory pro rádiové vlny. Možnosti aplikace metody měření doby letu jsou tak rozsáhlé, že z ní vychází i další přístroje, jako radiolokátory nebo echolokátory.

Tato práce je proto zaměřena právě na tento princip měření, protože jeho parametry (dosah a přesnost) jsou zajímavé například i pro meteorologické aplikace a tedy využitelné i pro zatím nedořešené oblasti jako je měření parametrů oblačnosti například nad moderními robotickými astronomickými teleskopy. Což bude modelový případ využití výsledků práce.

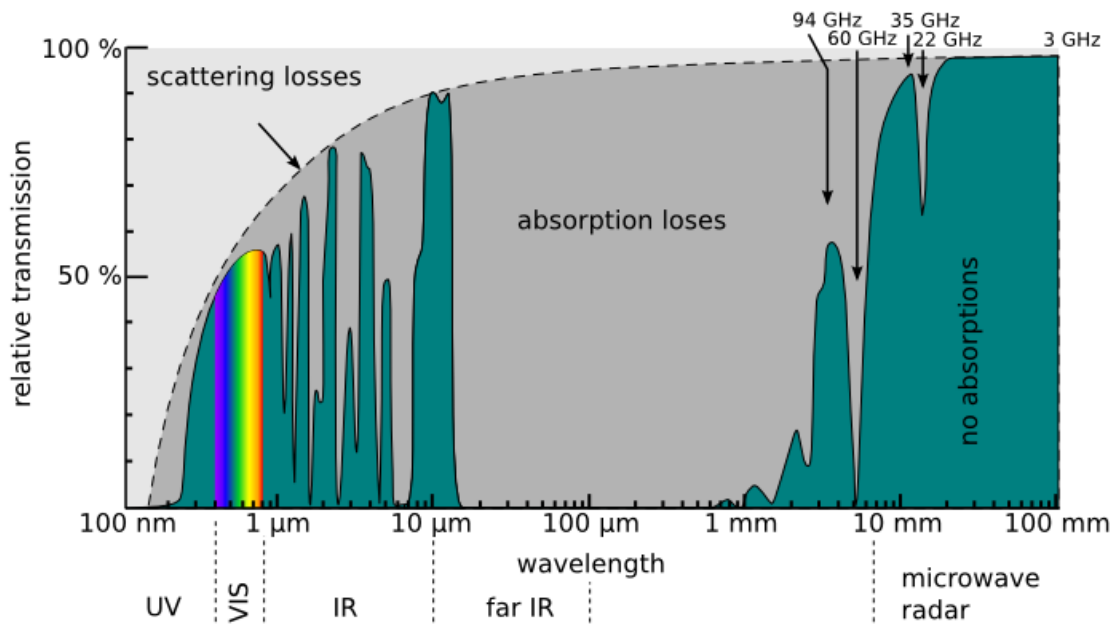
3 Požadavky na pulsní laserový vysílač

3.1 Modelová aplikace

3.2 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 jednak vlastnostmi atmosféry, která dobře propouští vlnové délky z oblasti viditelného spektra. A potom tím, že světlo z kratších vlnových délek (modrá oblast) se dobře odráží na oblačnosti a vodních krystalech.

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



Obrázek 1: Závislost transmisivity suché atmosféry na vlnové délce záření

3.3 Délka výstupního světelného impulsu

V případě, že nás zajímá metoda založená na měření doby letu, tak od laserového vysílače budeme také požadovat, aby umožňoval generovat krátké časové impulsy. Což je důležité proto, protože krátký časový impuls umožňuje dosáhnout lepšího časového rozlišení při měření a tím pádem i lepší prostorové rozlišení při měření vzdálenosti. Je to dáno tím, že v impulsu je obvykle vysláno velké množství fotonů ale zpátky do detektoru se jich vrátí pouze několik. A v případě dlouhého impulsu pak nejsme schopni určit z které části impulsu nám 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.

3.4 Energie impulsu

Energie výstupního impulsu je ideálně co největší, aby bylo dosaženo vysoké pravděpodobnosti zachycení některého zpětně odraženého fotonu. Ale vzhledem k tomu, že je třeba brát ohled i na bezpečnostní rizika takového systému, tak je potřeba se držet povolených norem pro intenzity elektromagnetického záření. Dalším limitem pak mohou být fyzikální vlastnosti prostředí a materiálů ve kterém se svazek má šířit neboť zvláště v případě použité Q-spínaného laseru existuje riziko, že by mohlo dojít k průrazu v materiálu.

3.5 Nejistota okamžiku sepnutí (jitter)

4 Druhy modulovatelných laserů

V dnešní době existuje mnoho typů LASERů. Avšak pouze malá část z nich je vhodná pro použití v LASERových dálkoměrech. Omezením často bývají rozměry aparatury, hmotnost, pořizovací cena, provozní podmínky a odolnost při manipulaci.

4.1 Polovodičový diodový LASER

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

4.2 Pevnolátkový diodově čerpaný LASER s generací druhé harmonické

Jde o konstrukční 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 generované vlnové délky. Toto konstrukční uspořádání je známo jako DPSSFD (Diode Pumped Solid State Frequency Doubled) LASER.

5 Teoretické limity konstrukce

5.1 Metody generace krátkých impulzů

Protože pro měření vzdálenosti metodou ToF je klíčové aby vysílač mohl generovat krátké světelné impulzy. Obvykle se toho dosahuje několika metodami.

5.1.1 Q spínání

V tomto režimu je krátký impulz generován tak, že optickému rezonátoru je nejdříve 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.

5.1.2 Synchronizace módu (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 impulsů se sub-nanosekundovou délkou.

5.1.3 Volně běžící pulzní režim (PCW)

5.1.4 Spínání ziskem (gain switching)

5.2 Numerický model laserového vysílače

5.2.1 Rychlostní rovnice

5.2.2 Generace druhé harmonické

5.2.3 Spínání impulsu ziskem

5.3 Zdroje ztrátového výkonu v DPSSFD

5.3.1 Účinnost čerpací diody

5.3.2 Konverzní účinnost aktivního prostředí

6 Dosavadní řešení problému

6.1 Jiné pulzní dálkoměry

6.2 Moderní laserové vysílače

Polovodičové diody, pevnolátkové lasery

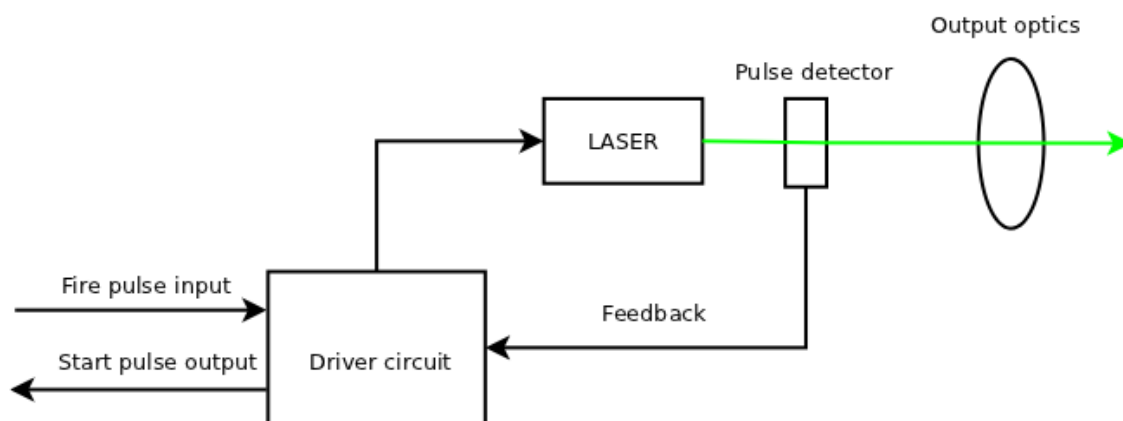
7 Řešení laserového vysílače

Pro konstrukci laserového vysílače vhodného pro ToF LRF, je potřeba několik dílčích součástí. Znázorněných v blokovém schématu.

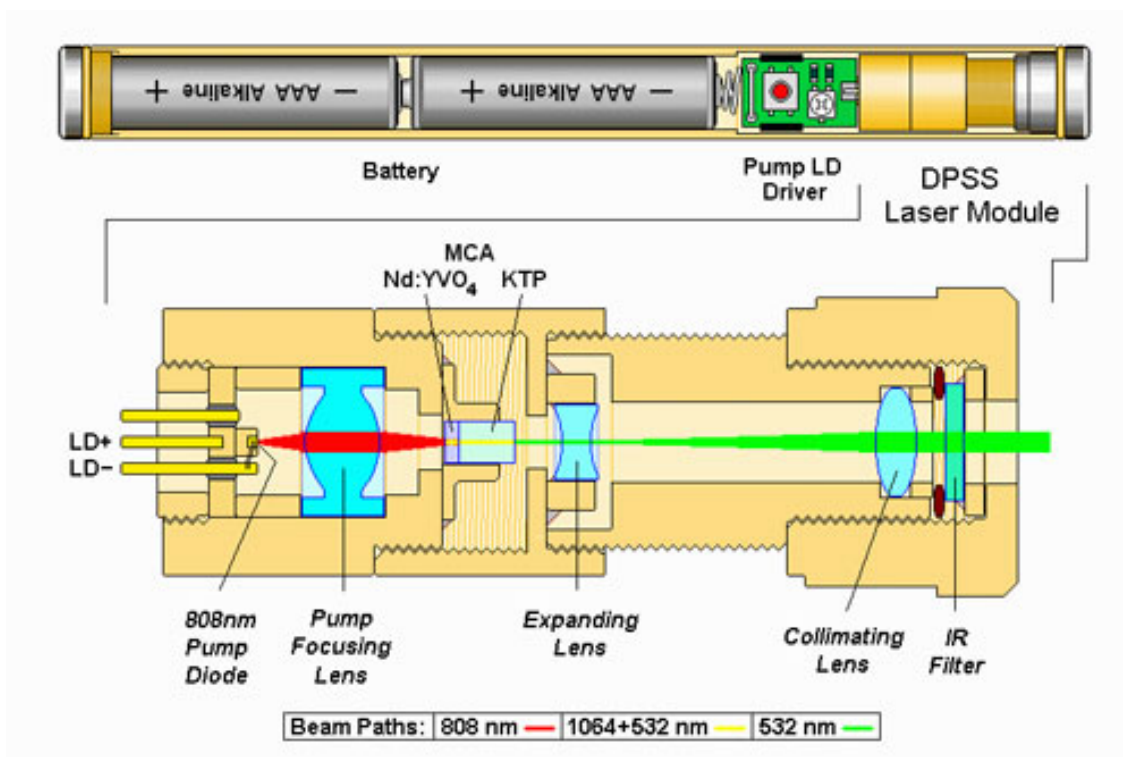
LASER - LASERový modul

7.1 Konstrukce DPSSFD modulu

Typická konfigurace levného diodově čerpaného laseru s generováním druhé harmonické 532nm je zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 2: Blokové schéma LASERového vysílače.



Obrázek 3: Typická konstrukce diodově čerpaného pevnolátkového laseru používaného, jako zelené laserové ukazovátko.

7.1.1 Čerpací dioda

Polovodičová čerpací dioda, která je na začátku DPSSFD modulu 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. Tyto dvě diody mají běžně společný jeden terminál. Protože každá z diod má dva vývody, tak je možných několik způsobů zapojení v pouzdře. Označují se písmeny P, N, M. Referenční dioda pak dále bývá rozlišována jako MD (monitor Diode) a laserová dioda LD (LASER Diode).

Referenční zpětnovazební fotodioda, se ale nedá použít ke kalibračním účelům, protože takto indikovaný výkon se může měnit mezi jednotlivými várkami LASERů až o jeden řád.

její vyzařovaná vlnová délka je ovšem poměrně silně závislá na teplotě přechodu v polovodičové struktuře a u běžných GaAlAs diod se teplotní koeficient, změny vlnové délky pohybuje okolo hodnoty 0,25nm/C. Absorpční čára aktivního prostředí laseru NdYag je však široká pouze XX nm. Což klade poměrně vysoké nároky i na stabilizaci vlnové délky. Vysoká provozní teplota LASERové diody navíc vede ke zvýšení prahu LASERové generace a tím pádem, ke zvýšení potřebného budícího proudu, který má za následek vyšší ztrátový výkon. Další problémem, který při vysokých pracovních teplotách může nastat, je mode-hopping, který se projevuje náhodným přeskokováním vyzařovaných vlnových délek.

Z tohoto důvodu, byl celý modul společně s čerpací diodou vybaven masivním chladičem umožňujícím dobrý odvod tepla z LASERového systému.

7.1.2 Optika

7.1.3 Původní "Regulační" obvod

7.2 Parametry laserových modulů

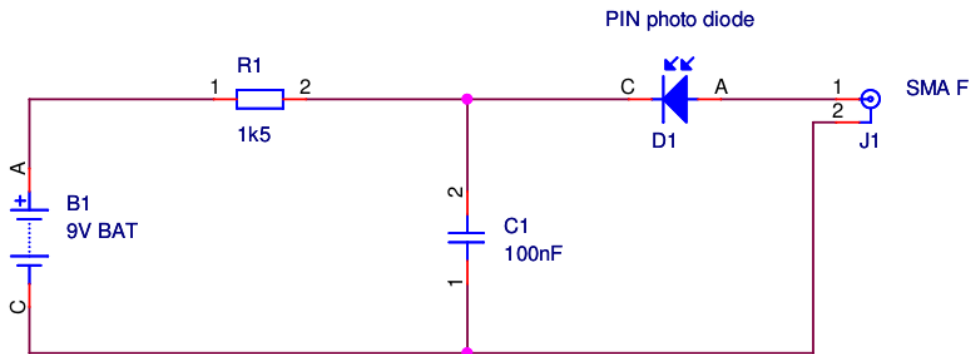
7.2.1 Běžné provozní hodnoty

7.2.2 Rozdíly mezi laserovými moduly

7.3 Měření krátkých světelných impulzů

K tomu aby bylo možné kvantifikovat dosažené parametry LASERového vysílače, je potřeba umět změřit 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 proto jeden takový snímač zkonstruován. Jeho zapojení je znázorněno na obrázku 4.

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, osciloskop impedančně přizpůsobený na 50 Ohm. Snížená impedance je zde důležitá, kvůli možnosti rychlého odvedení náboje z přechodu diody.



Obrázek 4: Schéma detektoru s PIN diodou.

8 Relaxační kmity LASERu

Práh generace použitých modulů.
Výsledky měření během kontinuálního čerpání.

9 Vlastní Řídící elektronika

9.1 Stabilizovaný zdroj proudu

9.2 Pulsní budič laserové diody

10 Diskuse dosažených výsledků

10.1 Dosažené parametry vysílače

10.2 Možnosti dalšího vylepšení

10.2.1 Zapouzdření vysílače

10.2.2 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 $10^{\circ}C$.

10.2.3 Kombinace s jinými přístroji

11 Závěr

Výsledkem práce je prototyp laserového vysílače vhodného pro další experimentální využití. . . .

Seznam obrázků

1	Závislost transmisivity suché atmosféry na vlnové délce záření	8
2	Blokové schéma LASERového vysílače.	11
3	Typická konstrukce diodově čerpaného pevnolátkového laseru používaného, jako zelené laserové ukazovátko.	11
4	Schéma detektoru s PIN diodou.	13

Reference

- [1] Zdroj obrázku reflektivity oblačnosti
- [2] Driving Diode Lasers is Straightforward
- [3] Osram set for green diode ramp in 2012