

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Řídicí obvody laserových diod**

**vedoucí práce: Ing. Jiří Švarný, Ph.D.  
autor: Jiří Navrátil**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří NAVRÁTIL**  
Osobní číslo: **E08B0383P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Řídicí obvody laserových diod**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište jednotlivé typy polovodičových laserů.
2. Charakterizujte a definujte důležité parametry laserových diod.
3. Uveďte obvodová řešení různých způsobů řízení optického výkonu laserových diod.
4. Vypracujte přehled dostupných integrovaných driverů nízkovýkonových polovodičových laserů.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Švarný, Ph.D.  
Katedra technologií a měření  
Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Švarný, Ph.D.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011  
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis typů polovodičových laserů, jejich vlastností a parametrů a dále na způsoby řízení jejich optického výkonu. Práce také obsahuje přehled a popis některých konkrétních integrovaných řídicích obvodů.

## **Klíčová slova**

Laser, laserová dioda, polovodičový laser, řídicí obvod, typ laseru, parametr

## **Abstract**

The bachelor thesis presents the types of semiconductor lasers, its attributes and parameters and methods of driving their optical power output. The bachelor thesis also includes overview and description of some concrete laser diode drivers.

## **Key words**

Laser, laser diode, semiconductor laser, driver circuit, laser type, parameter

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 1.6.2012

Jiří Navrátil

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Švarnému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině za to, že mi umožnila studium na vysoké škole a že mi ve studiu podporovala.

## Obsah

Obsah .....	8
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	9
Úvod .....	11
1 Lasery obecně – historie, princip, dělení .....	12
2 Polovodičové lasery – laserové diody .....	16
2.1 Princip .....	16
2.2 Typy .....	18
2.2.1 Homostrukturní .....	18
2.2.2 Heterostrukturní .....	19
2.2.3 S rozloženou zpětnou vazbou .....	20
2.2.4 S kvantovými jámami .....	21
2.2.5 Hranově vyzařující .....	22
2.2.6 Plošně vyzařující .....	22
2.3 Vlastnosti .....	22
2.3.1 Důležité parametry laserových diod .....	23
2.3.2 Parametry laserového záření .....	25
2.3.3 Způsoby pouzdření .....	27
2.3.4 Degradace laserů .....	28
2.3.5 Aplikace v praxi .....	29
3 Řídicí obvody .....	30
3.1 Řízení teploty, proudu a výkonu - samostatné obvody .....	31
3.1.1 WLD 3343 .....	32
3.1.2 LTC 1923 .....	33
3.1.3 LDA1-CPI .....	34
3.1.4 iC-NZP .....	36
3.1.5 MAX 3946 .....	37
3.1.6 SY 88422L .....	38
3.1.7 PLD série .....	39
3.1.8 FL500 .....	40
3.2 Řízení teploty, proudu a výkonu - profesionální řídicí platformy .....	41
3.2.1 LDC 500 .....	42
3.2.2 LDX 3200 .....	43
4 Seznam výrobců řídicích obvodů nízkovýkonných polovodičových laserů .....	44
Závěr .....	45
Použitá literatura .....	47



## Seznam použitých zkratk a symbolů

Tab. 1 Seznam použitých zkratk a symbolů

symbol / zkratka	název	význam
<b>Násobné předpony</b>		
m	mili	$10^{-3}$
$\mu$	mikro	$10^{-6}$
n	nano	$10^{-9}$
k	kilo	$10^3$
M	mega	$10^6$
G	giga	$10^9$
<b>Ostatní</b>		
%	procento	1 % = 0,01
ppm	parts per million	1 ppm = 0,000001
q	q	celé číslo
RMS	root mean square	efektivní hodnota
EEL	edge emitting laser	hranově vyzářující laser
h	hodina	jednotka času
ms	milisekunda	jednotka času
s	sekunda	jednotka času
$\mu\text{m}$	mikrometr	jednotka délky
mm	milimetr	jednotka délky
nm	nanometr	jednotka délky
$\mu\text{F}$	mikrofarad	jednotka elektrické kapacity
V	volt	jednotka elektrického napětí
$\Omega$	ohm	jednotka elektrického odporu
$\text{k}\Omega$	kiloohm	jednotka elektrického odporu
A	ampér	jednotka elektrického proudu
mA	miliampér	jednotka elektrického proudu
Gb	gigabit	jednotka informace
$\text{cm}^2$	centimetr čtvereční	jednotka plochy
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia	jednotka teploty
$\mu\text{W}$	mikrowatt	jednotka výkonu
mW	miliwatt	jednotka výkonu
MW	megawatt	jednotka výkonu
DBR	distributed Bragg reflector	laser s Braggovým reflektorem
SQWL	single quantum well laser	laser s jednou kvantovou jámou
DFB	distributed feedback	laser s rozprostřenou zpětnou vazbou
MQWL	multi quantum well laser	laser s více kvantovými jámami

symbol / zkratka	název	význam
LED	Light Emitting Diode	luminiscenční dioda
GaAlAs	galium aluminium arsenid	materiál
GaAs	galium arsenid	materiál
GaInAsP	galium indium arsenid fosfor	materiál
polovodič N	majoritní nosiče náboje - elektrony	materiál
polovodič P	majoritní nosiče náboje - díry	materiál
USD	americký dolar	měnová jednotka
$\Lambda$	lambda (velká)	mřížková konstanta
VCSEL	vertical cavity surface emitting laser	plošně vyzařující laser
L	označení indukčnosti	součástka
R	elektrický odpor / označení rezistoru	veličina / součástka
C	kapacita / označení kondenzátoru	veličina / součástka
$\lambda$	lambda	vlnová délka
LIDAR	light detection and ranging	zařízení
RADAR	radio detection and ranging	zařízení
SONAR	sound navigation and ranging	zařízení
TEC	thermoelectric cooler	zařízení
TOSA	transmitter subassembly	zařízení
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation	zařízení
< >	je menší než, je větší než	znaky nerovnosti
$\pm$	plus mínus	plus mínus
dI	derivace proudu	derivace proudu
dP	derivace výkonu	derivace výkonu
I	elektrický proud	veličina
PIN dioda	typ fotodiody	součástka
h	Planckova konstanta	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
f	frekvence	veličina
W	energie	veličina

## Úvod

Využívání laserů je dnes velmi rozšířené jak ve speciálních průmyslových či lékařských aplikacích tak v našem každodenním životě.

Úkolem mojí bakalářské práce je poskytnout informace o řízení optického výkonu laserů se zaměřením na laserové diody, vytvořením seznamu výrobců řídicích obvodů a jejich popis. Dalším úkolem je popis typů polovodičových laserů a důležitých parametrů.

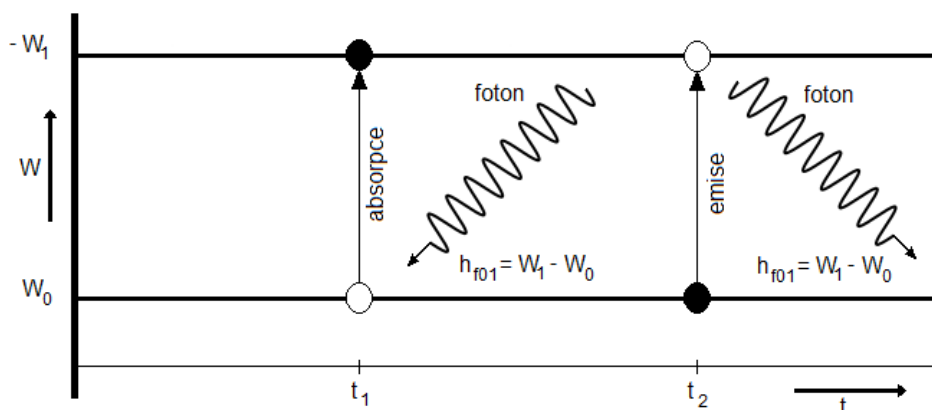
Práce je rozdělena na několik částí, které postupně pojednávají o laserech obecně, typech polovodičových laserů, jejich hlavních parametrech a vlastnostech a řízení jejich optického výkonu. Součástí práce je přehled některých na trhu dostupných řídicích obvodů a jejich vlastností a parametrů.

## 1 Lasery obecně – historie, princip, dělení

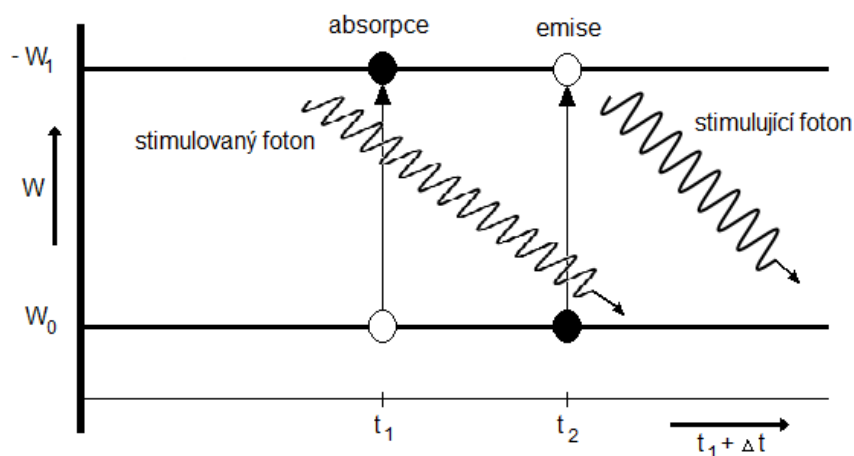
Slovo LASER je akronymem anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation , tj. zesílení světla stimulovanou emisí záření. Jde o optický zdroj elektromagnetického záření. Může být zdrojem záření, které lidské oko vidí (vlnová délka  $\lambda$  asi 400nm až 800nm) či záření které lidské oko není schopno rozpoznat - ultrafialové ( $\lambda < 400\text{nm}$ ) či infračervené ( $\lambda > 800\text{nm}$ ).

První laser byl demonstrován v r. 1960 Theodorem Maimanem (USA 1927–2007). Předchůdcem laseru byl MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) který nezesiloval světlo, ale mikrovlnné záření ( $\lambda = 1\text{mm}$  až  $10\text{cm}$ ). Teoreticky byl popsán a následně zkonstruován v 50. letech 20. století. [1]

Obecně se laser skládá ze 3 hlavních součástí: zdroj energie, rezonátor a aktivní prostředí. Zdroj dodává energii do aktivního prostředí laseru. Elektrony v látce aktivního prostředí přestupují na vyšší energetické hladiny (za dodávky elektrické energie) a dochází k excitaci. V aktivním prostředí je potom stav inverzní populace - nerovnovážný stav, kdy je většina elektronů ve vybuzeném - excitovaném stavu. Aby se stav stal opět rovnovážným, začnou se elektrony vracet na místa s nižší energetickou hladinou a při přestupu na tuto hladinu dojde k vyzáření (emisi) energie ve formě fotonu. Tyto fotony reagují s ostatními elektrony inverzní populace a tím vzniká řetězová reakce, kterou nazýváme stimulovanou emisí, foton který vyzáření dalšího fotonu způsobil, nazýváme foton stimulující. Nutno dodat, že fotony jsou emitovány se stejnou fází, polarizací a vlnovou délkou a lze tedy jejich svazek nazvat koherentním zářením. [2]

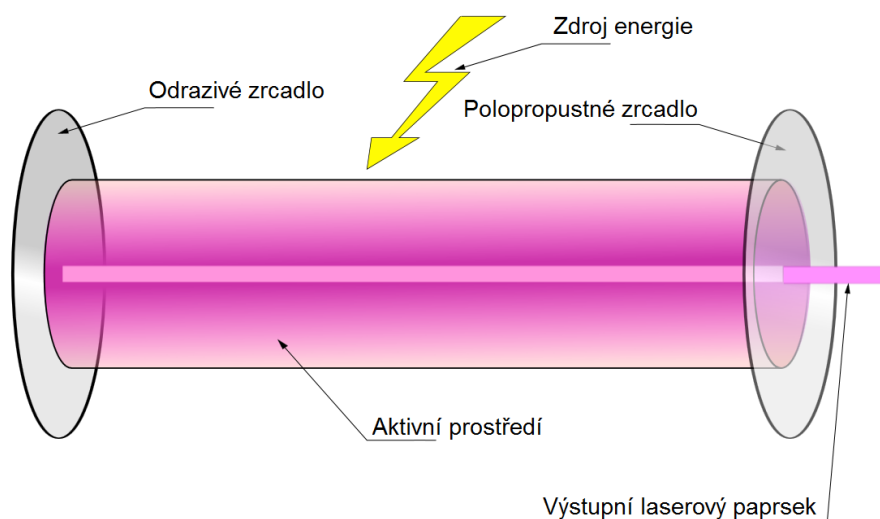


Obr. 1 Spontánní emise záření (převzato z [2])



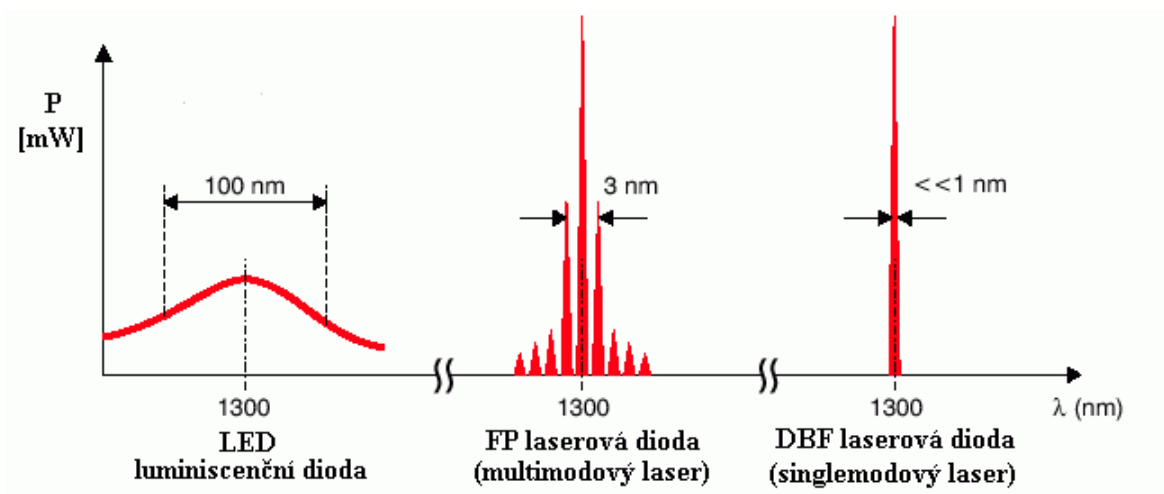
Obr.2 Stimulovaná emise záření (převzato z [2])

Kolem tohoto prostředí se nachází rezonátor. Nejjednodušší rezonátor je tzv. Fabryův-Perotův. Ten je tvořen dvěma rovinnými rovnoběžnými zrcadly v určité vzdálenosti [2]. Jedno zrcadlo je odrazivé, druhé je polopropustné. Fotony se odrážejí od obou zrcadel a opakovaně tak prochází aktivním prostředím a nutí další elektrony k přestupu na nižší energetické hladiny a vyzařování fotonů. Polopropustným zrcadlem část fotonů z aktivního prostředí projde a z laseru vychází požadovaný svazek optického záření.



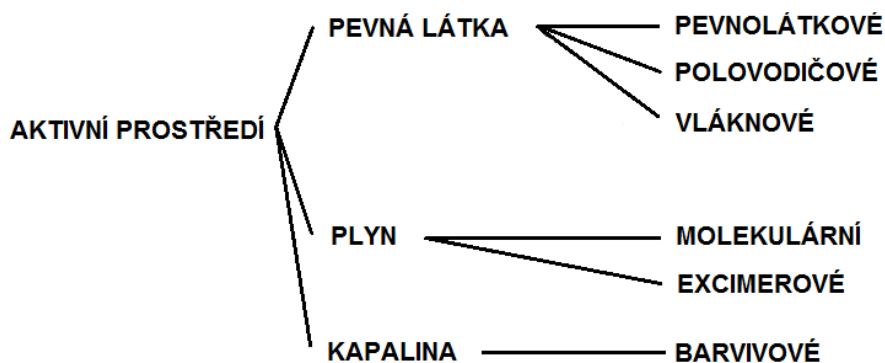
Obr.3 Schéma laseru (převzato z [22])

Jak bylo zmíněno výše, záření je koherentní (fotony mají stejnou fázi, vlnovou délku, a směr letu) a tudíž i monochromatické (je zastoupena jedna vlnová délka). Naprosto dokonalé koherence v praxi nelze docílit. Na následujícím obrázku je porovnáno spektrum nemonochromatického a nekoherentního záření LED diody s laserovou diodou (multimodovou a singlemodovou). Z obrázku je patrné, že u laserové diody je do velmi malého rozptylu vlnových délek vložen velký výkon.



Obr.4 Spektrum LED vs. laserové diody (převzato z [21])

Lasery lze dělit dle několika kritérií. Je možno je dělit podle konstrukčního nebo materiálního hlediska. Jako zdroj energie se používá jen elektřina a tak je další možností dělení dle struktury aktivního prostředí (obr. 5).



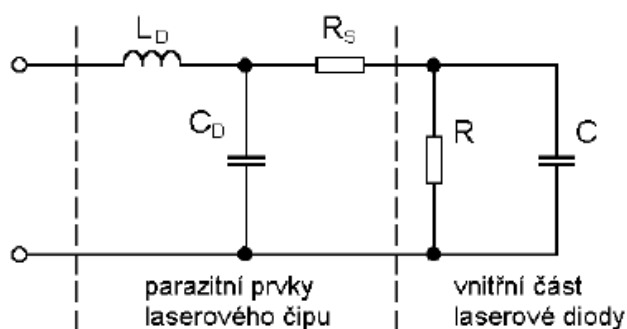
Obr.5 Rozdělení laserů dle struktury aktivního prostředí

Existují i další velmi speciální typy, jako rentgenové lasery či lasery na principu volných elektronů [1], [4]. Další možností by bylo dělit lasery dle vyzařované vlnové délky, výstupního výkonu, dle způsobu jejich provozu (kontinuální či pulsní režim) atd.

## 2 Polovodičové lasery – laserové diody

V této části práce si představíme jednu skupinu laserů z výše uvedených, a to polovodičové laserové diody. Nejprve se seznámíme se specifiky laserových diod, s principu generace světelného paprsku a s konstrukcí jejich rezonátoru. Dále si rozdělíme polovodičové lasery na několik typů, povíme několik informací o vlastnostech těchto diod, jejich degradaci, pouzdření a v závěru kapitoly se zaměříme na jejich využití v praxi.

Na obr. 6 máme příklad náhradního schématu laserové diody, konkrétně VCSEL s Braggovými reflektory (tento typ podrobněji popsán dále). Prvky  $L_D$  a  $C_D$  reprezentují indukčnost a kapacitu kontaktů,  $R_S$  reprezentuje odpor kontaktů připojených k Braggovým reflektorům. Pomocí prvků  $C$  a  $R$  je modelován PN přechod.[23]



Obr. 6 Náhradní model VCSEL diody s Braggovými reflektory (převzato z [23])

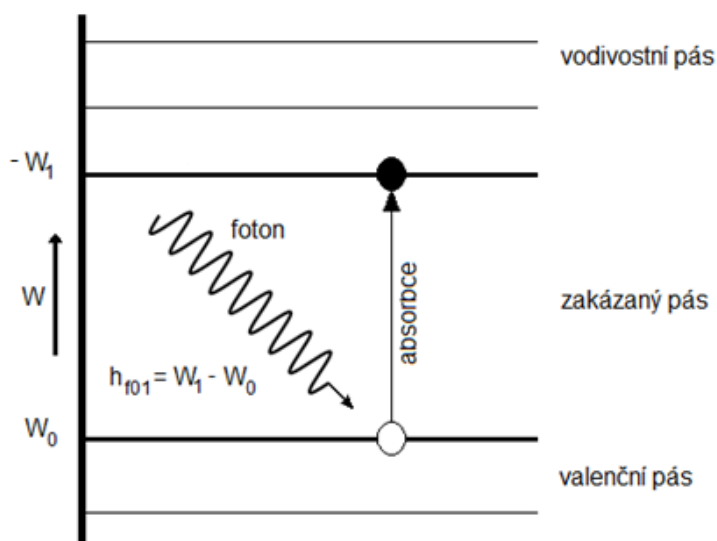
### 2.1 Princip

Polovodičový laser je zařízení, které je opatřeno zpětnou vazbou (rezonátorem). Tento rezonátor není tvořen dvěma samostatnými zrcadly (rezonátor typu Fabry-Perot), ale je tvořen odraznými ploškami, které se získají odštěpením polovodičového materiálu podél krystalových ploch. Pak je mezi vzduchem a krystalem velký rozdíl v indexu lomu a odštěpený krystal pak funguje jako zrcadlo. Polovodičový krystal plní tedy nejen funkci aktivního prostředí laseru, ale i funkci rezonátoru. Další možností jak zkonstruovat rezonátor je pomocí difrakčních mřížek (více v kapitole 2.2.3).



Pokud je koeficient zesílení v rezonátoru dostatečně vysoký, pak se mění optický zesilovač na optický oscilátor - laserovou diodu. Takovéto lasery někdy nazýváme lasery injekčními, protože energii jim dodává injektovaný elektrický proud.

Na rozdíl od většiny ostatních laserů zde nedochází k přechodům mezi vzdálenými energetickými hladinami, ale k přechodům mezi pásy velmi těsně uspořádaných energetických hladin. [4]



Obr. 7 Energetický model polovodiče (převzato z [2])

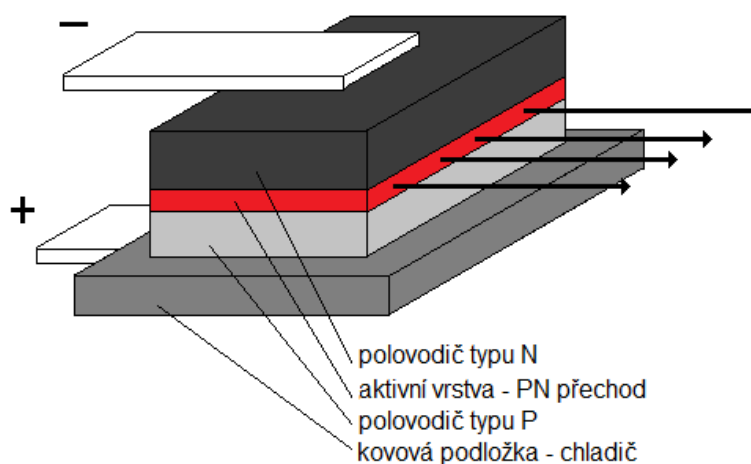
Aktivní prostředí vzniká při injekci elektronů a děr z PN přechodu nebo z heteropřechodu. Pokud přes PN přechod teče nízký proud, je generováno spontánní záření s náhodnou fází a šířící se všemi směry. Zvyšování proudu vede k zužování spektra spontánní emise fotonů a zároveň k růstu intenzity vyzařování v oblasti maxima spektrálního rozdělení emise. Pokud roste intenzita nelineárně s růstem buzení, nazýváme tento proces superluminiscence. Režim superluminiscence také generuje fotony s rozdílným fázovým posunem a ty se dále šíří všemi směry. Pokud nastane rovnováha mezi stimulovaným zesílením a ztrátami, dochází k přechodu do laserového režimu. Záření se zde stává koherentním. Míra koherence závisí na kvalitě a typu použitého rezonátoru. [2]

## 2.2 Typy

Lasery lze rozdělit dle mnoha parametrů. Nás budou zajímat lasery z hlediska jejich vnitřní struktury a pak z hlediska vyzařování.

### 2.2.1 Homostrukturální

Na homostrukturálním laseru z materiálu GaAs bylo v r. 1962 poprvé dosaženo emise koherentního záření [2]. Je tvořen PN přechodem, nejsou na něm skokové a výrazné změny indexu lomu (které by podporovaly optické soustředění svazku) ani vysoká potenciálová bariéra (k zajištění soustředění nosičů náboje). Záření se pak soustřeďuje vlivem gradientu indexu lomu a rozdílné koncentrace nosičů elektrického náboje. Aktivní oblast je velmi široká (u GaAs 1  $\mu\text{m}$  až 3  $\mu\text{m}$  [2]) a je potřeba vysoké hustoty prahového proudu. Při generaci záření dochází ke ztrátám vlivem úniku záření do okolních vrstev polovodičů. Kvůli vysokým ztrátám a malé účinnosti je v provozu nutno homostrukturální laser dostatečně chladit, ovšem hlavně kvůli své nízké účinnosti má v praxi mizivé využití. [2]



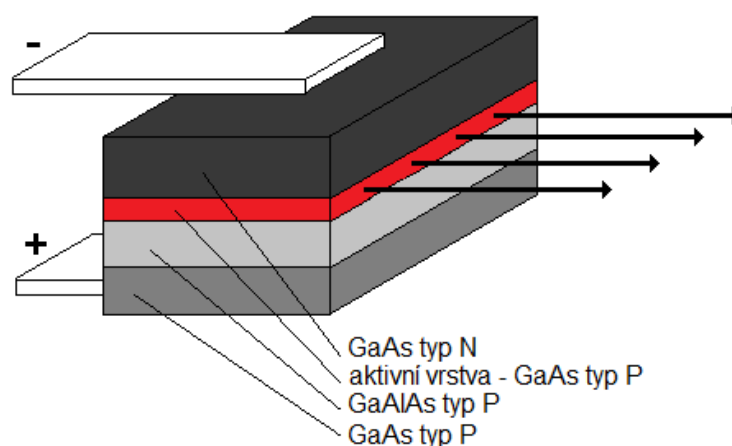
Obr. 8 Homostrukturální laser (převzato z [2])

## 2.2.2 Heterostrukturní

Tyto lasery využívají ke své funkci heteropřechody. Heteropřechodem rozumíme přechod mezi polovodiči různého typu na jedné podložce. Na heteropřechodu dochází ke skokové změně indexu lomu oproti okolním vrstvám. Působením heteropřechodů se do zvolených oblastí soustřeďují injektované nosiče a záření, přičemž oblasti soustředění záření a nosičů mohou, ale nemusí být totožné. Dle počtu heterostruktur v konstrukci laserového čipu lze rozdělit na typ s jednoduchou a s dvojitou heterostrukturou. [2],[3]

### *Typ s jednoduchou heterostrukturou*

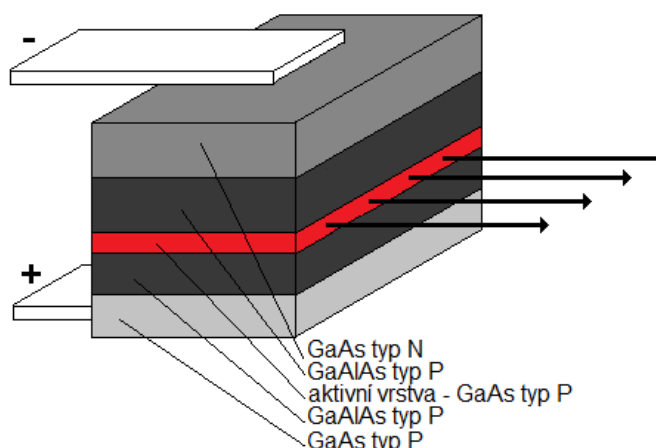
Aktivní vrstva je tvořena polovodičem typu P. Tato vrstva zároveň funguje jako potenciálová bariéra a jako jedna ze stěn optického vlnovodu. Je zde mnohem výraznější změna indexu lomu a asi pětinové hodnoty hustot proudů oproti homostrukturnímu typu. [2]



Obr. 9 Jednoduchá heterostruktura (převzato z [2])

### *Typ se dvojitou heterostrukturou*

Aktivní vrstva je zde obklopena dvěma vrstvami s větší šířkou zakázaného pásma. Má to tu výhodu, že nosiče náboje a záření je do aktivní vrstvy soustřeďováno z obou stran. Proud potřebný k dosažení laserového režimu je zde díky vysoké účinnosti (asi 75%) velmi malý, v řádu několika desítek mA. [2]



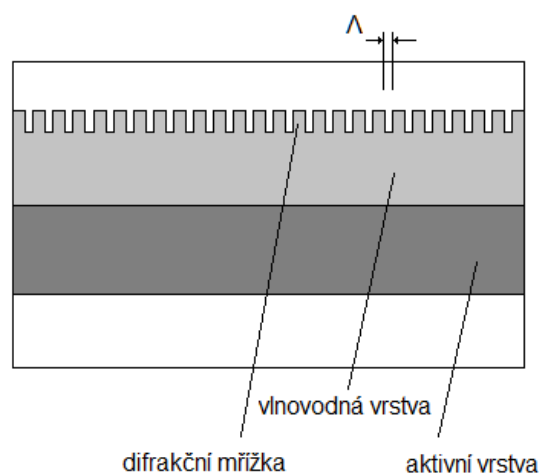
Obr. 10 Dvojitá heterostruktura (převzato z [2])

### 2.2.3 S rozloženou zpětnou vazbou

U tohoto typu je rezonátor tvořen periodickými strukturami - mřížkami. Dle umístění mřížky rozlišujeme dva typy laserů.[4]

#### *DFB lasery*

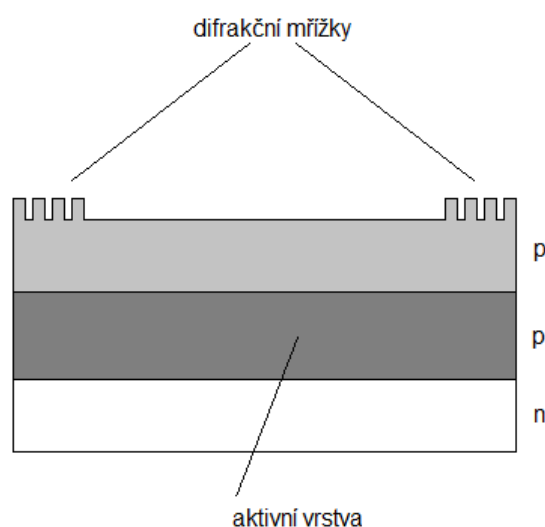
První z nich je laser DFB (distributed-feedback). Zde jsou mřížky umístěny v sousedství aktivní vrstvy a tvoří rozprostřený reflektor. Ten tak supluje funkci lokálních zrcadel typu Fabry-Perot. Povrch krystalu je zde pro omezení odrazů pokryt antireflexní vrstvou. Tento typ umožňuje jednomodový provoz a dosahuje úzké spektrální šířky (menší než 1nm [2]). Jejich další výhodou je relativně snadná výroba. V praxi nalézají uplatnění v telekomunikacích pomocí optických vláken pro  $\lambda=1300$  nm a  $\lambda=1550$  nm. [2],[4]



Obr. 11 DFB laser (převzato z [4])

### DBR lasery

Další laser založený na mřížkách označujeme jako DBR (distributed Bragg reflector). Mřížku zde označujeme jako rozprostřený Braggův reflektor. Tato struktura odráží záření právě tehdy, je-li mřížková konstanta  $\Lambda = q\lambda/2$ , kde  $q$  je celé číslo a  $\lambda$  vlnová délka záření. Mřížka je zde vnější, generace záření a zpětná vazba se odehrávají v různých částech struktury. Lze se setkat s dvěma typy DBR laserů – s jedním nebo se dvěma Braggovými reflektory. V praxi se spíše setkáme s typem se dvěma reflektory. [2],[4]



Obr. 12 DBR se dvěma reflektory (převzato z [4])

### 2.2.4 S kvantovými jámami

Jak již bylo řečeno u homostrukturních laserů, vzhledem k velké tloušťce aktivní vrstvy je potřeba vysoké prahové proudové hustoty k dosažení laserového režimu. Pokud bude tedy tloušťka aktivní vrstvy malá, bude zapotřebí i menší prahová proudová hustota. Elektron zde nabývá jen určitých energií. Ty odpovídají vlnovým délkám, jež jsou násobkem rozměrů aktivní vrstvy. [2] Pokud bude tloušťka velmi malá, začnou se tedy výrazně uplatňovat kvantové jevy. Běžně se lze setkat s tloušťkou kolem 10 nm. [4]

Existují dva typy těchto laserů. První z nich je laser s jedinou kvantovou jámou - SQWL (single quantum well laser). Schématicky je shodný s laserem s dvojitou heterostrukturou, jen aktivní oblast je zde velmi úzká. Současné technologie umožňují vyrobit aktivní vrstvu tvořenou jedinou atomovou rovinou. Vlastností takových laserů je velmi úzká spektrální charakteristika, prahový proud v řádu desetin až několik desítek mA a účinnost až 80%. [2]

Druhým typem je laser s několikanásobnými kvantovými jámami – MQWL (multi quantum well laser). Je zde několik kvantových jam, uspořádaných paralelně. Pokud bude N-quantových jam, bude zisk laseru N-krát vyšší než zisk jedné jámy. Nelze ovšem říci jednoznačně, že MQWL bude dosahovat vyššího zesílení než SQWL. Experimenty se ukázalo, že pro nízké proudové hustoty je vhodnější SQWL, pro vysoké zase MQWL. [4]

### **2.2.5 Hranově vyzařující**

Tento laser vyzařuje světelný paprsek z hrany přechodu. Označuje se EEL (Edge Emitting Laser) [2]. S tímto typem se můžeme setkat stále nejčastěji – technologie jeho výroby je dobře zvládnuta a má v praxi hojné využití.

### **2.2.6 Plošně vyzařující**

Tento laser vyzařuje z plochy rovnoběžné s rovinou přechodu a označuje se VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Toto záření by při použití běžného substrátu bylo pohlceno a ztraceno. Při využití transparentního substrátu se záření může odrážet např. od kovového kontaktu a být tak využito. Tato konstrukce laseru je účinnější než EEL a oproti EEL ho lze navázat do optického vlákna bez dalších přídavných komponent (optických čoček) až s 80% účinností. Plošně vyzařující lasery mají tedy velký potenciál hlavně u vláknových komunikačních systémů. [2]

## **2.3 Vlastnosti**

Nejprve si popíšeme některé parametry a vlastnosti samotných laserových diod a emitovaného záření, poté způsoby jejich zapouzdření a nakonec se zmíníme o degradaci polovodičových laserů.

### 2.3.1 Důležité parametry laserových diod

#### $I_p$

Oblast, kde nastává přechod mezi spontánní a stimulovanou emisí, nazýváme práh. U injekčních laserů je to prahová hustota budícího proudu, tzv. prahový proud  $I_p$  (nebo také  $I_{th}$  – threshold). Pro stanovení  $I_p$  se využívá L-I charakteristiky (viz dále). U kvalitní laserové diody je  $I_p$  v řádech jednotek mA. [2], [6]

#### L-I charakteristika

Jde o závislost optického výkonu na budícím proudu (obr. 13). Dioda, zapojená v propustném směru, vykazuje při malém proudu (menším než  $I_p$ ) pouze spontánní emisi záření. Při dosažení hodnoty  $I_p$  a vyšší přechází dioda k laserovému režimu, emise záření je stimulovaná a optický výkon prudce narůstá. Ideální L-I charakteristika je v oblasti nad prahovým proudem lineární. V praxi ovšem při dosažení výkonového maxima nastává saturace (nasyčení) a charakteristika je zakřivena, optický výkon zde již neroste lineárně. Mohou se objevovat i další nelinearity v podobě variací - kinků [2]. Kinky jsou náhlé změny L-I charakteristiky, způsobené např. zpětným odrazem výstupního záření do rezonátoru.

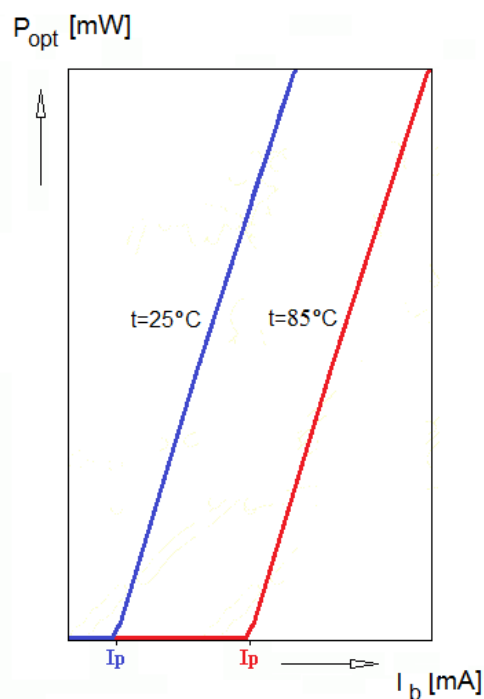
L-I charakteristika je také závislá na teplotě. Při změně teploty se celá L-I charakteristika posouvá po proudové ose, mění se tedy i  $I_p$ . Při měření se L-I charakteristika měří typicky pro dvě teploty – pokojovou (25 °C) a vysokou (85 °C). U některých typů laserů (hlavně DFB) se lze setkat i s měřením pro 0 °C.

#### Eta f

Jde o diferenciální účinnost laserové diody. Označíme ji Eta f (či řeckým písmenem  $\eta_f$ ) a spočítáme jako podíl změny optického výkonu a změny budícího proudu, tedy jako  $\eta_f = dP / dI$  a obvykle hodnotu uvádíme v mW/A. [2]

#### $P_{max}$

„Maximální optický výkon změřený v daném rozsahu proudů [6].“ Rozsah proudů je dán typem laserové diody. Obvykle je uváděn v mW.



Obr. 13 L-I charakteristika pro dvě různé teploty

**T**

Teplota, při které proběhlo měření parametrů diody. Typicky se parametry měří při pokojové teplotě  $25^\circ\text{C}$ . Udávána ve  $^\circ\text{C}$ .

 **$P_{th}$** 

„Optický výkon při prahovém proudu [6].“ Obvykle se udává v  $\mu\text{W}$ .

 **$U_i$** 

„Napětí na laserové diodě při proudu v propustném směru [6].“ Používá se velmi malý proud (např. 1 mA), který slouží k otestování správného zapojení vývodů. Takto malý proud by diodu nezničil ani při nesprávném zapojení. Hodnota udávána ve V.

 **$U_p$** 

„Napětí na laserové diodě při daném optickém výkonu [6].“ Toto napětí se mění jen velmi málo, typicky se pohybuje kolem 1 V. Obvykle se tedy hodnota udává ve V.

 **$R_s$** 

„Sériový odpor diody v propustném směru [6].“ Pro danou hodnotu optického výkonu se vypočítá z Ohmova zákona.



**$I_{\text{mon}}$** 

„Proud monitorovací PIN diodou, která je umístěna v pouzdře laserové diody, při daném optickém výkonu [6].“ Závislost velikosti tohoto proudu na optickém výkonu je lineární.

 **$I_{\text{dmon}}$** 

„Proud monitorovací diody za tmy při předpětí 2 V [6].“ Jde o velmi malé proudy, řádově nA.

### **2.3.2 Parametry laserového záření**

Paprsek vycházející z laserové diody se vyznačuje vysokou směrovostí, monochromaticností, koherencí a vysokou zářivostí. V kapitole je čerpáno ze zdrojů [2],[6].

#### **Směrovost**

Vyplývá z vlastností rezonátoru – v něm mohou existovat pouze ty vlny, které se šíří podél osy rezonátoru či se od ní jen nepatrně odchylují.

#### **Monochromaticnost**

Dokonalá monochromaticnost je vyzařování pouze jediné vlnové délky. Je dána tím, že ke generaci fotonu dochází pouze při rezonanční frekvenci použitého typu rezonátoru.

#### **Koherence**

Koherenci světelného svazku lze rozlišit na dva typy - prostorovou a časovou.

#### **Prostorová koherence**

Pokud fázový rozdíl intenzity elektrického pole ve dvou různých bodech, jimiž prochází vlnoplocha v libovolném čase  $t$ , bude nulový, pak mluvíme o prostorové koherenci.

#### **Časová koherence**

Pokud je v libovolném čase  $t$  s přičteným daným časovým intervalem  $\Delta t$  rozdíl fází elektromagnetické vlny stejný, pak mluvíme o časové koherenci vlny

## Koherenční délka

Je to délka, při níž je světlo ještě schopno interference. Je to důležitý parametr u aplikací, které interferenci záření využívají, např. u měření délky. U polovodičových laserů je v řádech centimetrů.

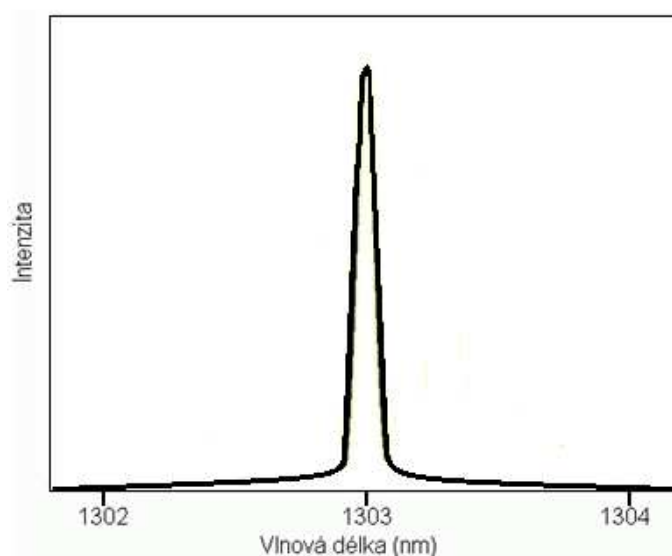
## Zářivost

„Zářivost laseru je definována jako zářivý tok vyzařovaný z jednotkového povrchu zdroje do jednotkového prostorového úhlu [2].” U laserových diod se častěji setkáváme s parametrem optický výkon, udávaný v mW. Ten udává výkon v pracovním bodě diody (tj. při daném proudu diodou v propustném směru). Se zářivostí a optickým výkonem úzce souvisí profil laserového svazku.

## Spektrum a profil laserového svazku

Spektrum by v ideálním případě (u singlemodového laseru) byla jedna spektrální čára. Laser by emitoval záření o jediné vlnové délce. Ve skutečnosti je rozložení kolem hlavní emitované vlnové délky Gaussovské (obr. 14).

Lze se také setkat s divergencí výstupního svazku záření. Je způsobena tvarem emitující vrstvy, horizontální a vertikální divergence může být rozdílná a svazek se potom jeví tvarově jako eliptický. Divergenci lze omezit použitím zaostřovacích čoček (více kapitola 2.3.3) nebo mřížky. Obojí má za následek zaostření laserového svazku v určitém bodě.



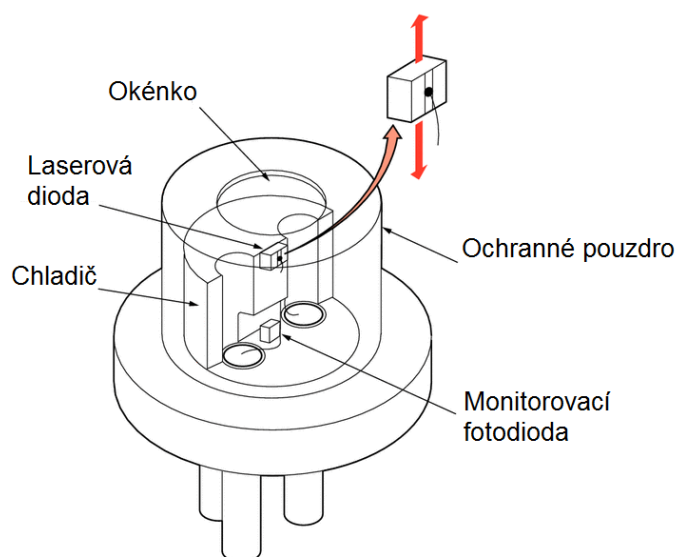
Obr. 14 Spektrum laserové diody (singlemodové)

### 2.3.3 Způsoby pouzdření

Pouzdro tvoří primárně ochranu diody před vnějšími vlivy, je hermeticky uzavřeno. Dalšími funkcemi pouzdra je snadnější osazování diod do obvodů nebo monitorování jejich funkce.

Pouzdro se skládá ze základní desky, na které jsou všechny součástky připevněny (obr. 15). V horní části se nachází okénko z průhledného materiálu, který může u dražších diod mít antireflexní (zabraňující odleskům) úpravu či může být nakloněno, aby se zamezilo zpětnému odrazu záření. Pouzdra pro telekomunikační diody obsahují často také optiku (zrcátko a čočku) pro zaostření laserového paprsku. Zaostřený paprsek se pak lépe zavádí do optického vlákna. Lze se též setkat s řešením Pigtail – optické vlákno je napevno spojeno s pouzdem diody. [2]

Pro monitorování výkonu lze využít toho, že laserový paprsek může z čipu vycházet dopředu i dozadu. „Zadní“ světlo lze použít k osvětlování monitorovací fotodiody - dopadá na ni asi 10% vyzařovaného výkonu. Proud, procházející přes fotodiodu, je přímo úměrný záření laseru. [2]



Obr.15 Pouzdro s monitorovací diodou (převzato z [24])

### 2.3.4 Degradace laserů

Zdrojem informací pro kapitolu o degradaci je [3]. Degradace laserů je způsobena řadou mechanismů. Dominance typu mechanismu závisí na mnoha faktorech – metoda výroby polovodiče, kvalita podložek, kvalita pouzření či zatížení diod při provozu. V souladu s poznatky získanými experimenty lze rozdělit degradaci laserů na 3 kategorie – zničení zrcadel v důsledku velké intenzity záření, vznik defektů tmavých čar a pomalá degradace. Výzkum degradace laserů má empirický charakter - zkoumáme jej na základě zkušeností z provozu a experimentů.

#### *Zničení zrcadel v důsledku velké intenzity záření*

Degradace vzniká typicky při impulsním provozu laserů s vysokou hustotou toku optického záření. Pokud hustota výkonu překročí kritickou hodnotu dovolenou pro polovodičové zrcadlo, tj.  $6 \pm 2 \text{ MW/cm}^2$  [3, str. 251], začnou se ve struktuře zrcadla objevovat defekty jeho krystalické mřížky. Tento způsob degradace je velice rychlý - nastává prakticky okamžitě po překročení kritické hodnoty hustoty optického výkonu.

#### *Vznik defektů tmavých čar*

Jde o mřížku dislokací, vznikající při provozu laseru. Ta se může časem rozšířit až na zrcadlo rezonátoru. Jde o poruchu dlouhodobějšího rázu – pokud se objeví, může se rozrůstat při provozu laseru po několik hodin. Tato porucha se tedy může vyskytnout hlavně po hodinách činnosti laserů v kontinuálním režimu, zřídka se objeví dříve. Při lokálním vzniku poruchy dochází k velké absorpci záření a s tím i k nárůstu hustoty prahového proudu laserem.

#### *Pomalá degradace*

Tento typ znehodnocování laseru nenastává okamžitě či v řádu hodin činnosti, jedná se o degradaci z dlouhodobého pohledu provozu, v řádech tisíců hodin. Jev takové degradace lze přirovnat stárnutí jakékoliv jiné, dlouhodobě používané součástky. Dokonalejší lasery z materiálu GaAlAs či GaInAsP mají životnost až kolem 10.000 h.

### 2.3.5 Aplikace v praxi

V praxi se setkáme s laserovými diodami hlavně v telekomunikačních sítích. Pro přenos laserového záření se používají optická vlákna (skleněná nebo plastová). Využívá se vlnových délek 850 nm, 1310 nm a 1550 nm, protože zde mají totiž optická vlákna nejmenší útlum. Používány jsou hlavně DFB lasery, které mají úzkou spektrální charakteristiku a umožňují vysoké modulační frekvence. Modulace signálu je kombinace signálu nesoucího informaci (modulační) a nosného signálu. [2] Některé řídicí obvody disponují vstupem pro externí modulační signál (např. harmonický, obdélníkový či trojúhelníkový signál). Tento signál je zkombinován s aktuální hodnotou proudu (v proudovém či výkonovém módu), tedy nosným signálem, pomocí modulátoru a tím získáváme modulovaný signál. [5] Jeden z důvodů modulace je, abychom mohli využitím vysokých frekvencí přenést nízké frekvence (pomocí světla přenést např. zvuk)

Dále několik slov o aplikaci nejen polovodičových laserů. V průmyslu se setkáme s využitím laserů, jako nástrojů pro bezdotykové opracování předmětu. Výhodou je, že se nástroj neopotřebovává, nevýhodou je velmi vysoká cena takových zařízení a tedy vhodnost pouze pro obrovské série výrobků. Používají se při svařování, vrtání, řezání nebo např. přesné doladování rezistorů (vysokým výkonem je odpařen materiál). Pro takové velké výkony se lasery používají v impulsním režimu. Čím je impuls kratší, tím větší výkon je do něj možno soustředit. Další průmyslovou aplikací jsou měřicí a detekční přístroje. [2]

V medicíně se lasery začaly používat při operacích oční sítnice. Jejich využití se dále rozšířilo na kožní lékařství a postupně se vyvinul celý obor laserové chirurgie. Je zde využíváno stejných vlastností laserů jako v průmyslu – soustředění vysokého výkonu na malou plochu a tudíž schopnost odpařovat tkáň. [2]

Další využití nalézají lasery ve vojenské technice a kosmonautice. Zde se používají pro laserové zaměrování, měření vzdáleností či navádění. Existuje systém LIDAR - funkcí obdobný jako RADAR nebo SONAR. LIDAR (na rozdíl od RADARu využívajícího rádiové vlny a SONARu využívající akustické vlny) využívá elektromagnetického vlnění o velmi vysokých frekvencích – světla.

Jak vidíme, využití laserů je velmi široké a není podstatou mé bakalářské práce se jím hlouběji zabírat. V práci o laserech mi přišlo vhodné jejich využití alespoň takto nastínit.

### 3 Řídicí obvody

Aby laserová dioda fungovala správně, je nutné ji nějakým způsobem řídit. K tomu slouží řídicí obvod, který má jak funkci napájení a zajištění stabilního výkonu diody, tak dle provedení může mít i ochranné prvky. Je vhodné diodu napájet proudovým zdrojem, který bude diodě dodávat konstantní proud i při změně zátěže. Řídicí obvod laserové diody je tedy ideálně lineární systém, který diodě dodává proud konstantní a bez rušení. [5], [17]

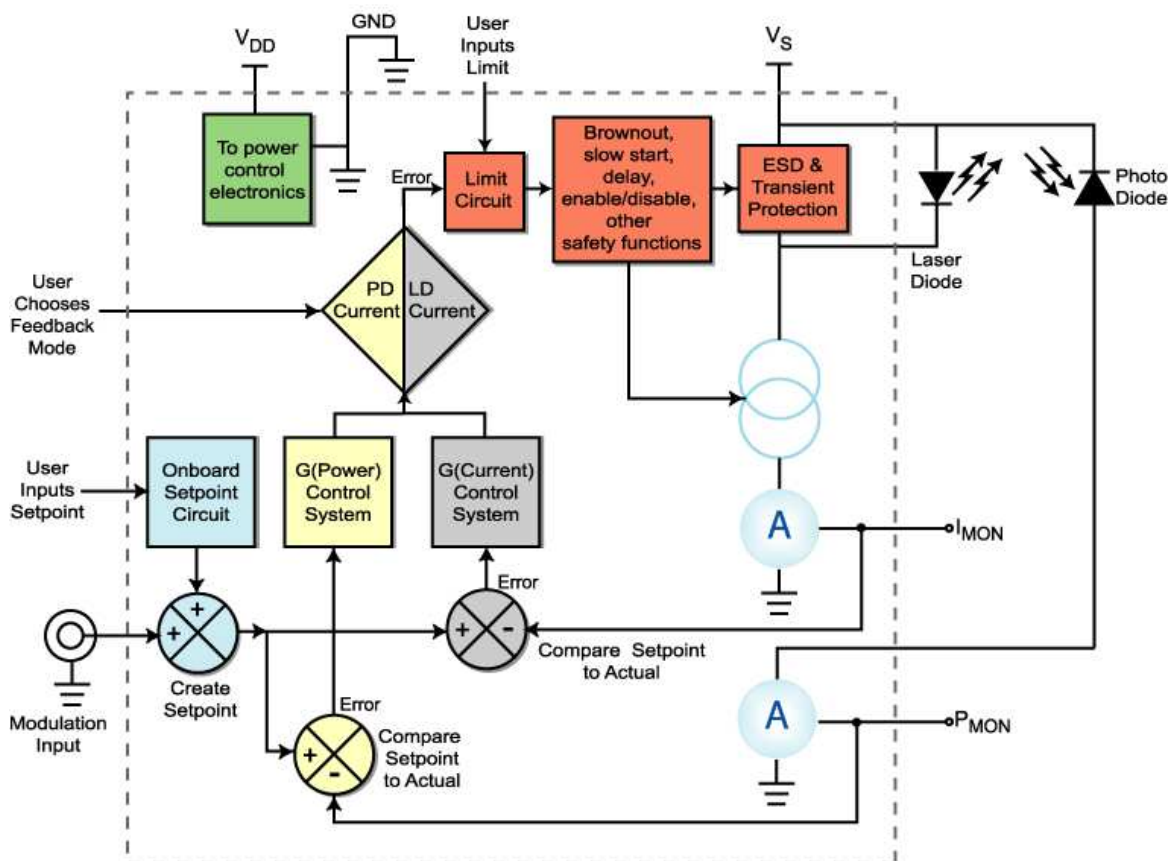
Mezi důležité ochranné prvky obvodu s laserovou diodou patří ochrana proti napětí na laserové diodě v závěrném směru (většímu než asi 1V). S laserovou diodou se proto připojuje antiparalelně ještě ochranná dioda. Ta v případě, že na ní a tedy i na laserové diodě vznikne přepětí, začne vést elektrický proud a tím laserovou diodu ochraňuje - přepětí na ní klesá či mizí. [17] Další ochranný prvek je u některých obvodů slow nebo soft start. Jde o pomalý náběh budícího proudu (udávaná strmost v mA/ms) a tedy pozvolný přechod od spontánní ke stimulované emisi. Strmost je dána vnitřním nastavením obvodu a lze ji vnitřním zásahem do obvodu a dle možností výrobce upravit. [15] Některé další konkrétní ochranné prvky jsou popsány zvlášť u konkrétních obvodů v následujících kapitolách.

Každý řídicí obvod musí mít zpětnou vazbu, tj. přivádět část výstupního signálu zpět na vstup a tento vstup jím ovlivňovat. Existuje záporná a kladná zpětná vazba. Pro potřeby řízení je využíváno stabilizačních vlastností záporné zpětné vazby. Dalším důležitým principem řízení je řídit pouze měřitelnými veličinami, protože veličiny, které nelze měřit, nelze ani řídit.

Pro řízení optického výkonu laserových diod lze použít dva odlišné systémy – nepřímé řízení pomocí proudu a teploty a řízení výkonu pomocí monitorovací fotodiody. Následně si popíšeme oba tyto systémy realizované pomocí integrovaných obvodů. Popíšeme si jak integrované obvody od různých firem, tak i dvě profesionální řídicí platformy.

Na obr. 16 máme blokové schéma módu konstantního výkonu a konstantního proudu v jednom obvodu. Uživatel může nastavit mód, ve kterém bude řídicí obvod pracovat, hodnotu proudu, limitní hodnotu proudu (ochranný prvek) a může připojit vnější modulační signál. V červených blocích jsou ochranné prvky jako omezovače proudu, slow start nebo ochrana proti výbojům a přechodným jevům. Modré bloky obstarávají

uživatelé zadanou hodnotu proudu nebo výkonu (tedy proudu fotodiodou). Žlutě jsou označeny bloky řízení v módu konstantního výkonu, šedivě bloky konstantního proudu. V obou módech nesmějí chybět součtové zesilovače, které porovnávají reálný proud změřený ampérmetry a proud nastavený uživatelem. Při neshodě je vyslán signál „error“ a proud je dle potřeby regulován. [5]



Obr. 16 Blokové schéma řídicího obvodu (převzato z [5])

### 3.1 Řízení teploty, proudu a výkonu - samostatné obvody

Při konstantním proudu by byl ideálně výkon diody také konstantní. Nutno ale počítat s tím, že okolní teplota a samotná teplota diody při provozu nejsou stálé. Aby byl výstupní výkon konstantní, musí být konstantní proud i teplota diody. Diodu je nutno efektivně chladit, přesto ovšem dochází k různým teplotním výkyvům. Pouhé řízení proudu by tedy bylo nedostatečné a bylo by zde vždy riziko zničení součástky (viz L-I charakteristika) - je nutno řízení dle další veličiny, a to teploty.

Přímé řízení výkonu pomocí fotodiody pracuje na principu opto-elektrického převodníku. Záření dopadající na fotodiodu je převedeno na elektrický signál a tím máme zpětnou vazbu. Dle velikosti signálu pak víme, zda je výkon laseru v nastavených mezích a zda je nutno výkon regulovat (tedy zvyšovat či snižovat).

Je nutné rozlišovat pojmy přesnost nastavení veličiny a stabilita veličiny. Přesnost znamená, že laser potřebuje přesně danou velikost veličiny pro svou funkci za daných podmínek. Po nastavení této veličiny potřebujeme, aby se její hodnota s časem neměnila, tedy její stabilitu. Následující seznam obvodů a platforem je čerpán ze zdroje [20].

### **3.1.1 WLD 3343**

Jde o analogový řídicí obvod od firmy Wavelegth Electronics Inc. určený pro laserové diody. Obvod nabízí dvě možnosti zapojení, a to jako obvod pro udržování konstantního proudu nebo obvod pro udržování konstantního výkonu. Dle výrobce kompatibilní se všemi typy laserových diod.

Je napájen 4,5 V až 12,5 V a je schopen dodávat laseru až 3 A proud dle typu. Dle zamýšleného dodávaného proudu se řídicí obvod montuje bez chladiče (do 500 mA), s chladičem a vodivou podložkou (do 1 A) a s ventilátorem (2 A).

V režimu konstantního proudu obvod sleduje přímo proud procházející laserovou diodou a převádí ho na napětí odpovídající tomuto proudu. Stabilita proudu v tomto režimu je dána s přesností 200 ppm (za 1 hodinu, při 25 °C). V režimu konstantního výkonu vytváří integrovaná monitorovací fotodioda proud, který je převeden na napětí úměrné tomuto proudu. Krátkodobá (1h měření) stabilita proudu je 0,01 %, dlouhodobá (24 h) potom 0,05 %. Všechny hodnoty jsou vztaženy k okolní teplotě 25 °C.

Výběr režimu se provádí zapojením součástek mezi určité piny. Při zapojení rezistoru 1 k $\Omega$  budeme mít režim konstantního proudu, při zapojení kondenzátoru 0,1  $\mu$ F pak režim konstantního výkonu. Maximální proud laserovou diodou je omezen rezistorem.

Obvod je díky svým možnostem dodávat do laserové diody až 3 A proud vhodný spíše pro diody výkonovější. Další omezení obvodu vyplývá z jeho menší teplotní stability. Obvod je dodáván jako integrovaná součástka se 14 piny. Cena 1ks je 99 USD. Všechny údaje o WLD 3343 byly čerpány ze zdroje [7].

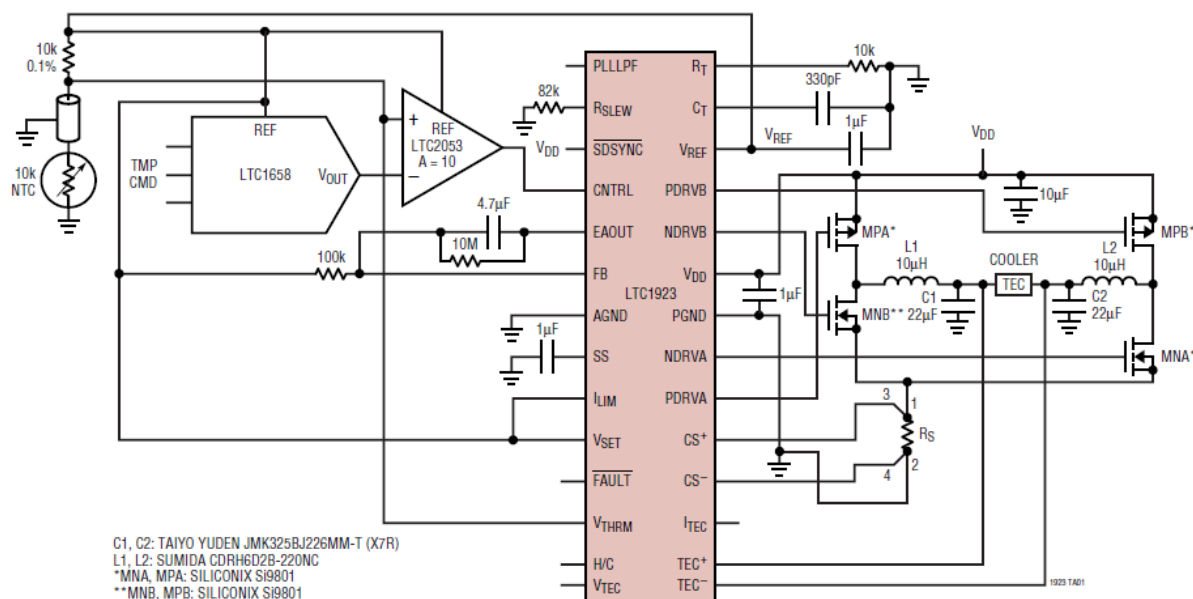




Ochrana před poruchou nebo špatným zapojením termistoru zajišťují dva komparátory, které hlídají napětí na tomto termistoru. Pokud napětí není v nastaveném rozsahu, je vygenerován signál FAULT. Signál sám o sobě ale řídicí obvod neodpojí – to musí zařídit uživatel buď využitím FAULT signálu a systémového mikroprocesoru k odpojení řídicího obvodu nebo pomocí externích PMOS a NMOS tranzistorů.

Ochrana před přepětím funguje tak, že pokud je rozdílové napětí na TEC vyšší než 2,5 V, TEC je odpojen od napětí. Toto napětí může být zvýšeno přidáním odporového děliče paralelně zapojeného s TEC.

Výhodou tohoto obvodu je vysoká tepelná stabilita, nevýhodou je pulsní řízení (pomocí pulzní šířkové modulace). Obvod je typicky využíván k řízení laserů v oblasti telekomunikací a medicíny a také pro regulaci teploty jiných elektronických součástek, např. procesorů. Údaje o LTC 1923 byly čerpány ze zdroje [9].



Obr.18 Typické zapojení obvodu LTC 1923 (převzato z [9])

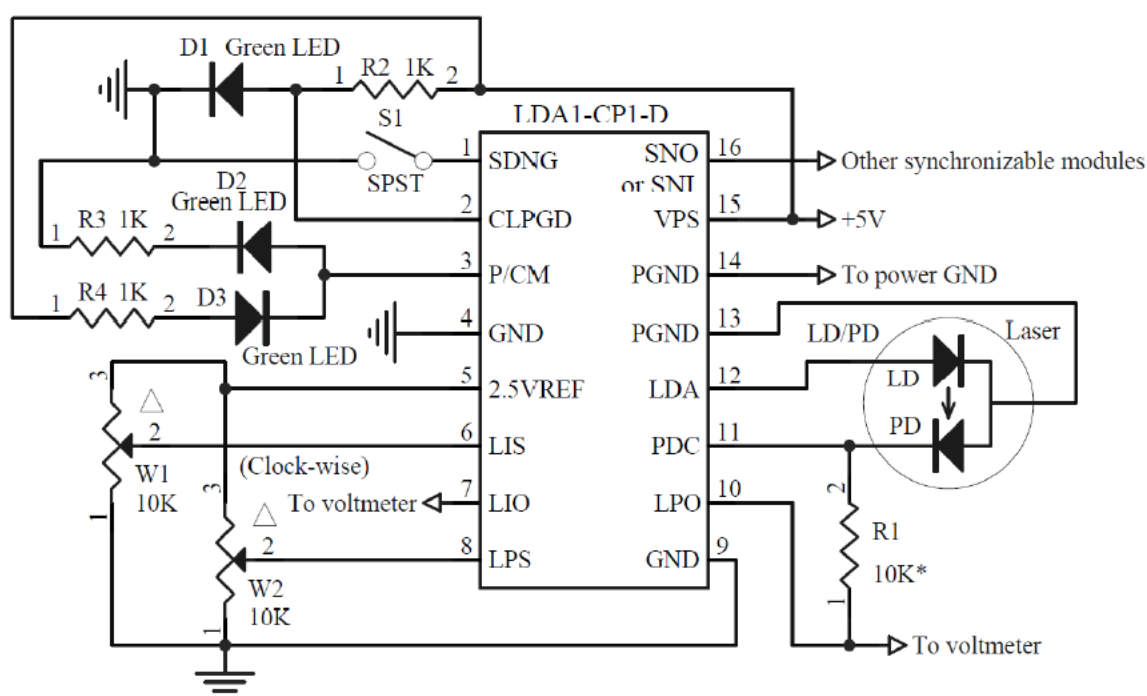
### 3.1.3 LDA1-CP1

Jde o řídicí obvod firmy Analog Technologies Inc. Jde o elektronický modul, který dovede řídit laserovou diodu pomocí konstantního proudu nebo konstantního výkonu. Výstupní proud a výkon může být nastaven lineárně, pomocí dvou vstupních napěťových pinů a monitorován pomocí dvou výstupních. Při nastavení na konstantní proud má obvod

zabudovanou výkonovou ochranu, při nastavení na konstantní výkon poskytuje nadproudovou ochranu.

Obvod je napájen 3 V až 6 V, šum na výstupním proudu je dle výrobce 0,05 % RMS (při 2A) a účinnost řídicího obvodu je  $\geq 90\%$ . Maximální výstupní řídicí proud jsou 2 A. V součástce je zabudovaná PWM na frekvenci 500 Hz.

Součástka je dodávána v šestivrstevném pouzdře, které má za úkol odstínit rušení elektromagnetickým polem ostatních součástek vně obvodu a zároveň zabránit rušení od ostatních součástek. Cena součástky je 110 USD za 1 kus. Všechny údaje o LDA1-CP1 byly čerpány ze zdroje [7].



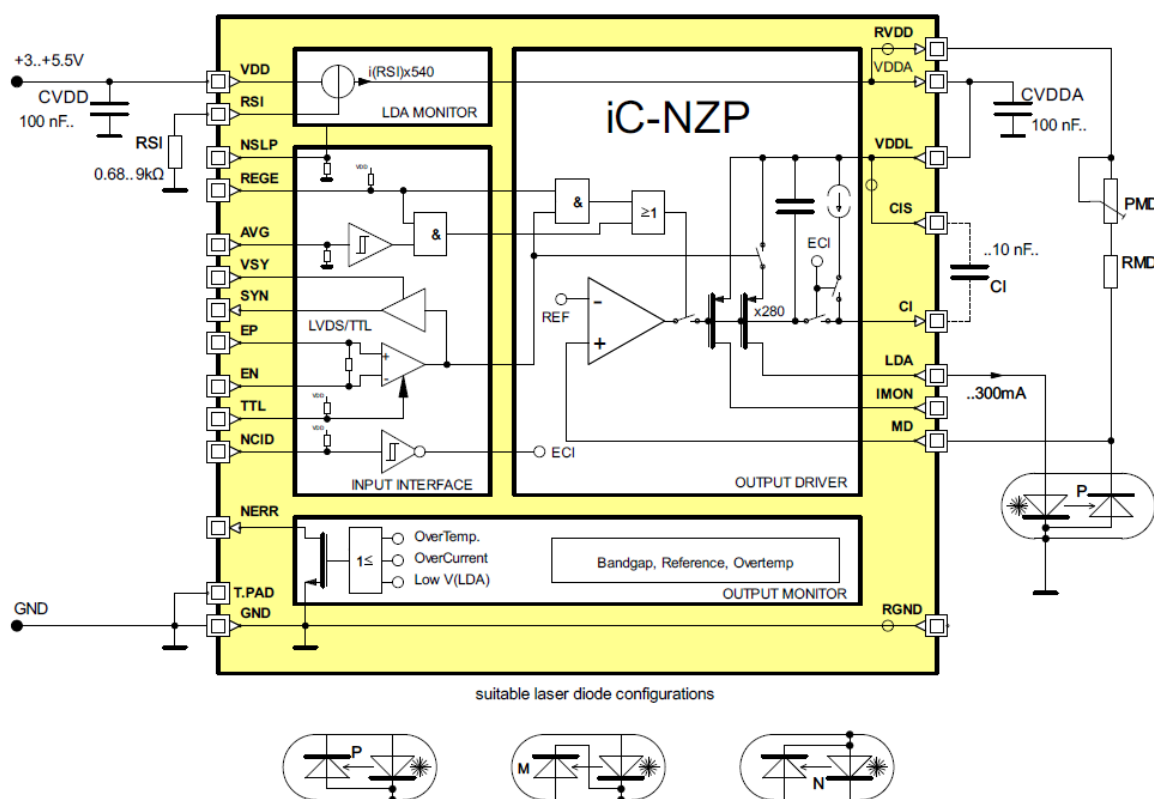
Obr.19 Typické zapojení obvodu LDA1-CP1 (převzato z [10])

### 3.1.4 iC-NZP

Tento obvod je produktem firmy iC Haus. Nabízí možnost řízení výkonu (konstantní výkon) nebo řízení proudu (konstantní proud) laserovou diodou. Maximální proud dodávaný laseru je až 300 mA. Pokud chceme nastavit velikost konstantního výkonu, musíme využít externího rezistoru. Výrobce zdůrazňuje nízký odběr proudu v režimu spánku ( $< 50 \mu\text{A}$ ) a následné probuzení z tohoto režimu za čas  $< 300 \text{ ms}$ . Obvod umí řídit laser jak v kontinuálním režimu, tak v režimu pulsním. V pulsním režimu může vysílat impulsy s frekvencí až 155 MHz.

Obvod poskytuje ochranu laserové diody před příliš vysokou teplotou a zároveň vyšle chybový signál. Dále generuje chybové signály při nadproudu a podpětí.

Obvod je využíván u laserových diod v pulsním či kontinuálním režimu. Typickou aplikací mohou být laserová ukazovátka, přístroje pro měření vzdálenosti nebo čtečky čárových kódů. Součástka je dodávána v pouzdře 4x4 mm s 24 vývody. Všechny údaje o iC-NZP byly čerpány ze zdroje [7].

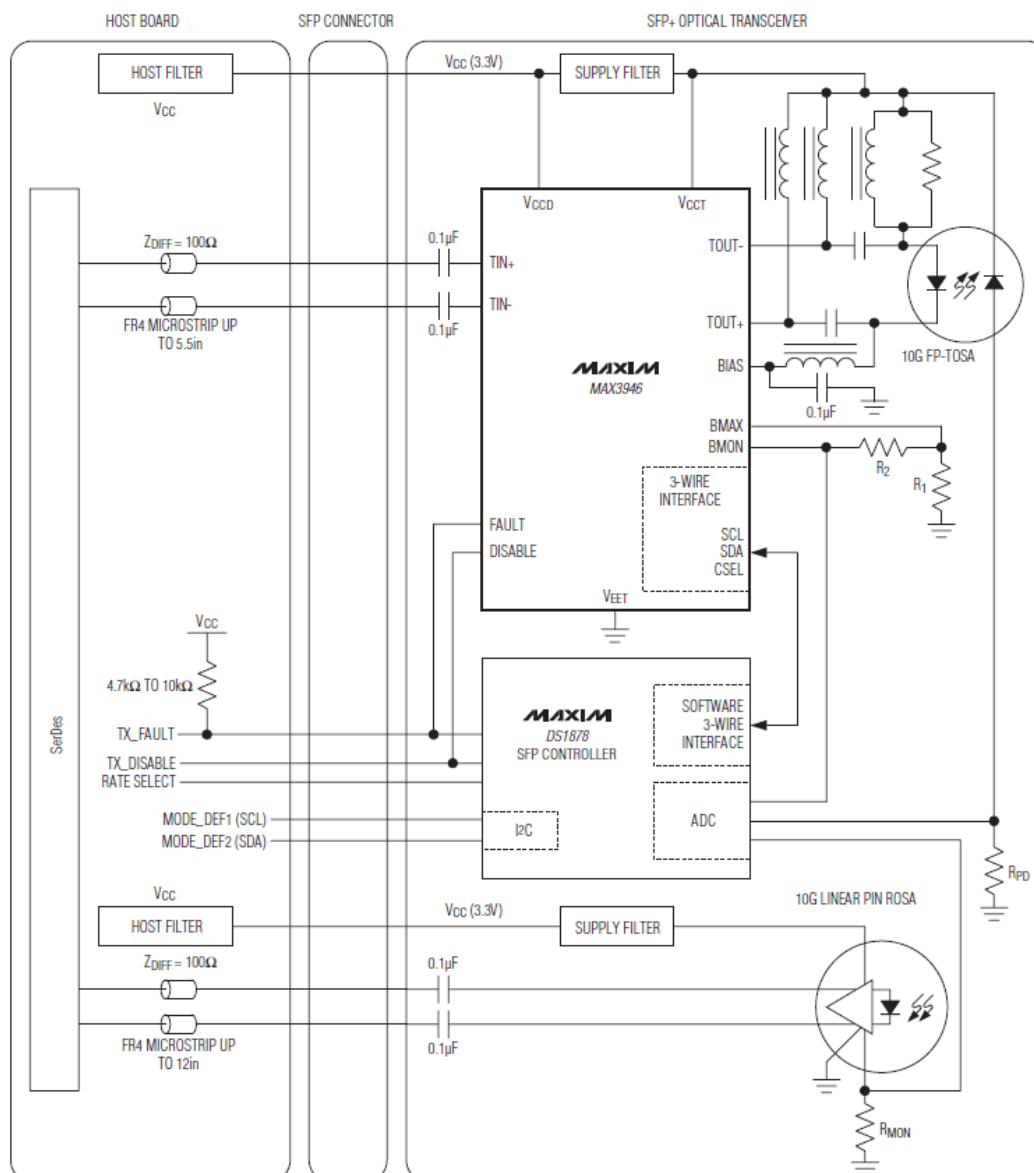


Obr.20 Typické zapojení obvodu iC-NZP (převzato z [11])

### **3.1.5 MAX 3946**

Obvod vyrábí firma Maxim Integrated Products. Je vybaven vlastním modulátorem a generátorem proudu pro laserovou diodu. Obě tyto části mohou být samostatně deaktivovány. Je schopný dodávat laserové diodě proud od 5 mA do 80 mA. Stabilita proudu je typicky 1 % z hodnoty, maximálně 3 % z hodnoty. Dále umí zpracovat modulační proud od 10 mA<sub>Peak-Peak</sub> do 80 mA<sub>Peak-Peak</sub>. Mezi ochranné prvky patří generace chybových signálů při překročení daných napěťových rozmezí na určitých pinech. Zařízení je schopno detekovat dva typy chyb, tzv. Hard Fault a Soft Fault. Při vygenerování Hard Fault je výstupní část, a tedy i laser, odpojena. Při generaci Soft Fault je vysláno jen varování, výstup zůstává připojen.

Obvod je optimalizován pro použití s moduly TOSA (transmitter optical subassembly) a typickou aplikací v kombinaci s laserovou diodou je přenos dat a komunikace po optických vláknech s přenosem až do 11,3 Gb/s. Všechny údaje o MAX 3946 byly čerpány ze zdroje [7].

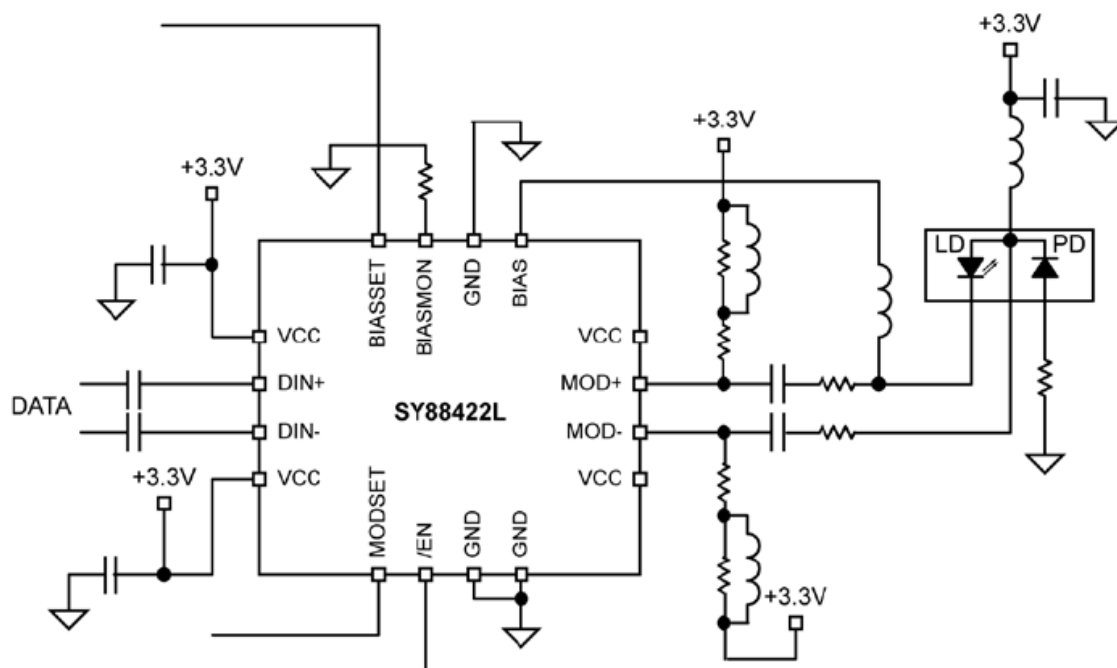


Obr.21 Typické zapojení obvodu MAX 3946 (převzato z [12])

### 3.1.6 SY 88422L

Jedná se o řídicí obvod od společnosti Micrel Inc. Obvod je schopen dodávat laserové diodě proud až 100 mA a modulační proud až 90 mA.

Tento obvod nenabízí žádné integrované ochranné prvky. Je dodáván v pouzdře 3x3mm 16 piny. Typickou aplikací obvodu, který řídí laserovou diodu, jsou datové a telekomunikační sítě s rychlostí přenosu až 4,25 Gb/s. Všechny údaje o SY 88422L byly čerpány ze zdroje [7].



Obr.22 Typické zapojení obvodu SY88422L (převzato z [13])

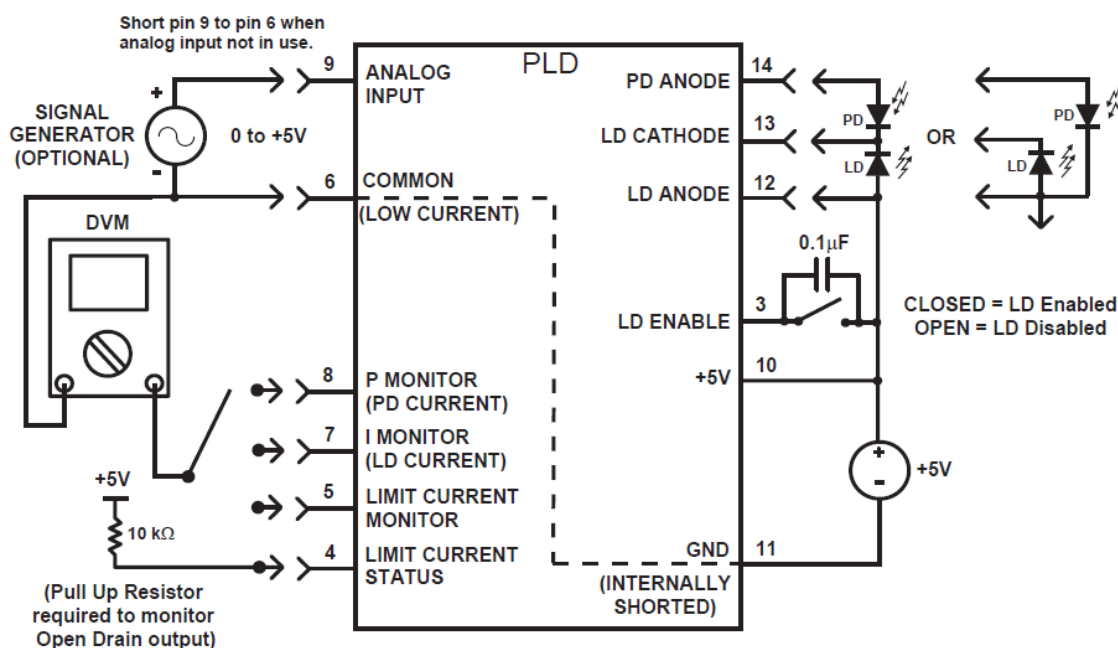
### 3.1.7 PLD série

Je další řídicí obvod od společnosti Wavelength Electronics Inc. Nabízí dva módy řízení – konstantní výkon a konstantní proud. Výstupní proud je dle modelu řídicího obvodu 200 mA, 500 mA, 1,25 A, 5 A a 6,5 A.

Krátkodobá (1 h) stabilita proudu je <math><100\text{ ppm}</math> (u 5 A a 6,5 A modelu je <math><200\text{ ppm}</math>). V režimu konstantního výkonu je stabilita výkonu <math><0,02\text{ \%}</math> z hodnoty. Pro externí modulaci je šířka pásma jiná u každého modelu, pohybuje se od 200 kHz do 100 kHz. Při 100 kHz je hloubka modulace 90 % u všech modelů. Obvod je napájen 5 V.

Obvod má integrovaný ochranný prvek Active Current Limit, který zajišťuje nejen ochranu laseru před příliš vysokým proudem, ale zároveň slouží (pomocí LED výstupu) jako indikátor toho, že proud řídíme s maximální stabilitou. Active Current Limit po překročení nastaveného proudu odpojí laserovou diodu od napájení.

Součástka je dodávána v pouzdře s 15 piny. Modely 200 mA a 500 mA mají integrovaný chladič, ostatní modely mají navíc ventilátor. Cena za 1 ks je 364 USD. Všechny údaje o sérii PLD byly čerpány ze zdroje [14].



Obr.23 Typické zapojení PLD 500 (převzato ze [14])

### 3.1.8 FL500

Je opět řídicím obvodem firmy Wavenegh Electronics Inc.. Laserovou diodu řídí pouze v módu konstantního proudu. Je schopen dodávat až 500 mA výstupního proudu či sloužit jako dva nezávislé řídicí obvody, každý pro nejvýše 250 mA proud.

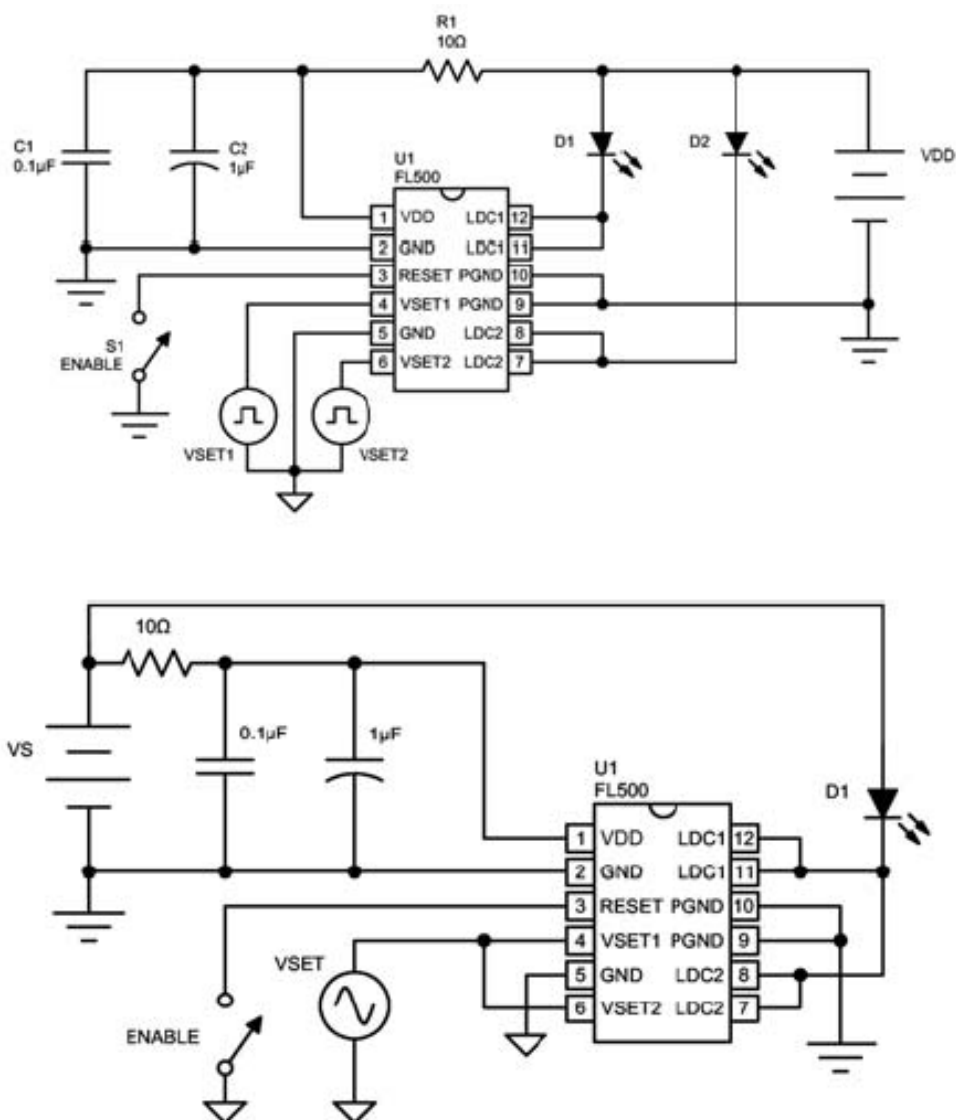
Krátkodobá stabilita proudu (1 h, 25 °C) je 40 ppm, dlouhodobá (24 h, 25 °C) je 75 ppm. Napájení může být v rozmezí 3 V až 12 V.

V obvodu jsou integrovány ochranné prvky jako slow start nebo brown out protection. Druhý zmiňovaný prvek sníží proud laserovou diodou na asi 10  $\mu$ A při poklesu napájení obvodu pod 2,7 V.

Při kombinaci obvodu s obvodem FL591 Evaluation Board získáme navíc ochranu před nadproudem a možnost dalšího módu řízení – konstantního výkonu. Pak je krátkodobá (1 h) stabilita výkonu 0,019 % a dlouhodobá (24 h) 0,011 % z hodnoty.

Obvod je dodáván jako součástka s 12 piny, jeho cena za 1 ks je 55 USD. Cena FL500 + FL 591 Evaluation Board je za 1 ks 205 USD. Všechny údaje o FL 500 a F L591 byly čerpány ze zdroje [15], [16].





Obr.24 FL500 – horní část režim 2 x 250mA, dolní část 1x 500mA (převzato z [15])

### 3.2 Řízení teploty, proudu a výkonu - profesionální řídicí platformy

Profesionální řídicí platformy nabízejí lepší výbavu než samostatné obvody. Není nutné nic vyrábět a přidělovat. Jejich parametry jsou také zpravidla velmi dobré, navíc nabízejí možnost připojení k počítači a lepší uživatelský komfort ovládání. Nevýhodou je často velmi vysoká cena takových přístrojů.

### **3.2.1 LDC 500**

Série LDC 500 jsou profesionální řídicí platformy laserových diod od firmy Stanford Research Systems. Ze série LDC 500 jsou vyráběny tři typy – LDC 501, LDC 502 a LDC 500. Rozdíl je hlavně v proudu dodávaném diodě – LDC 500 až 100 mA, LDC 501 až 500 mA a LDC 502 až 2 A. LDC 500 obsahuje také Peltierův článek pro kontrolu a řízení teploty.

Pokud se zaměříme na model LDC 500, jako některé předešlé řídicí obvody nabízí dva módy řízení – konstantní proud a konstantní výkon. Dle výrobce je unikátní vlastností LDC 500 schopnost přecházet mezi oběma módy bez nutnosti vypnout laserovou diodu. Maximální výstupní proud je 100 mA s šumem  $< 0,3\mu\text{A RMS}$ . Proudový drift na  $1^\circ\text{C}$  je  $< 10$  ppm. Proud lze nastavit po  $1\mu\text{A}$  s přesností  $\pm 0,02\%$  z celého proudového rozsahu. Krátkodobá stabilita proudu (1 h) je  $< 5$  ppm, dlouhodobá (24 h) je  $< 15$  ppm, obě hodnoty z celého rozsahu.

Peltierův článek má rozlišení při nastavení teploty  $0,001^\circ\text{C}$  s přesností  $0,01^\circ\text{C}$ . Krátkodobá stabilita teploty (1 h) je  $\pm 0,001^\circ\text{C}$ , dlouhodobá (24 h) je  $\pm 0,002^\circ\text{C}$ . Teplotní stabilita je  $0,0005^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  okolní teploty. V řízení Peltierova článku lze také vybrat dva módy – udržování konstantního proudu článkem a udržování konstantní teploty. Mezi oběma módy lze přecházet pouhým stisknutím tlačítka. Nutno dodat, že výrobcem udávané hodnoty jsou označovány jako typické, nikoliv maximální.

Platforma dále nabízí možnost modulace externím signálem, u módu konstantního proudu s nastavitelnou šířkou pásma až 1 Mhz, u módu konstantního výkonu až 10 kHz.

Mezi další vlastnosti patří ochranné prvky – soft start, nastavitelné proudové a napěťové limity, rychlé odpojení zdroje. Pro komunikaci s počítačem je LDC 500 vybaven ethernetovým portem a dále porty RS 232 a GPIB.

Profesionální řídicí platforma je vhodná pro testování laserových diod a pro aplikace, kde je nutné velmi přesné a stabilní řízení. Cena za platformu je 2.495 USD (verze LDC 500 a LDC 501) a 2.795 USD (verze LDC 502). Všechny údaje o LDC 500 byly čerpány ze zdroje [18].



Obr.25 LDC 500 (převzato z [18])

### 3.2.2 LDX 3200

Řada LDX obsahuje řídicí platformy laserových diod od firmy ILX Lightwave. Pro svůj popis si vyberu platformu LDX 3210, která je schopna dodávat laseru až 100 mA. Dále se vyrábí modely LDX 3220 (až 500 mA) a LDX 3232 (až 4 A).

Platforma nabízí řízení módem konstantního proudu či konstantního výkonu. Mód konstantního proudu má ještě dvě alternativy – konstantní proud pro modulaci v malé (do 15kHz) a velké (až 1 Mhz) šířce pásma.

Proud lze nastavit do 50 mA s rozlišením 1  $\mu$ A a přesností  $\pm 0,05$  % z hodnoty, od 50 mA do 100 mA s rozlišením 2  $\mu$ A a přesností  $\pm 0,05$  % z hodnoty. Krátkodobá stabilita proudu (1 h) je <10 ppm, dlouhodobá (24 h) je <20 ppm.

Mezi ochranné prvky platformy patří nastavitelná proudová omezení, soft start a rychlé odpojení proudového zdroje od laserové diody. Při výrobě zařízení byly také použity odstíněné kabely, aby bylo zabráněno vnějšímu rušení přístroje.

Pro komunikaci s počítačem nebo jiným zařízením má LDX 3210 výstupní port GPIB. Cenu platformy výrobce na svých stránkách neuvádí.

Firma ILX Lightwave nabízí i platformy pro tepelné řízení laserových diod na principu Peltierových článků. Údaje o sérii LDX 3200 byly čerpány ze zdroje [19], [20].

## 4 Seznam výrobců řídicích obvodů nízkovýkonných polovodičových laserů

Tab. 2 Seznam některých výrobců řídicích obvodů laserových diod

Společnost	Stát	Internetové stránky
Wavelegth Electronics Inc.	USA	<a href="http://www.teamwavelength.com">http://www.teamwavelength.com</a>
Linear Technology	USA	<a href="http://www.linear.com">http://www.linear.com</a>
Analog Technologies Inc.	USA	<a href="http://www.analogtechnologies.com">http://www.analogtechnologies.com</a>
iC Haus	Německo	<a href="http://www.ichaus.de">http://www.ichaus.de</a>
Maxim Integrated Products	USA	<a href="http://www.maxim-ic.com">http://www.maxim-ic.com</a>
Micrel Inc.	USA	<a href="http://www.micrel.com">http://www.micrel.com</a>
Analog Devices	USA	<a href="http://www.analog.com">http://www.analog.com</a>
AOS Technology Ltd.	Velká Británie	<a href="http://www.aost.co.uk">http://www.aost.co.uk</a>
IXYS	USA	<a href="http://www.ixys.com">http://www.ixys.com</a>
Zarlink Semiconductor Inc.	USA	<a href="http://www.zarlink.com">http://www.zarlink.com</a>

## Závěr

Předchůdce laseru, maser, byl zkonstruován v 50. letech 20. století a první laser v r. 1960 Theodorem Maimanem. Laser je elektrooptický převodník - elektrickou energii transformuje na energii optickou. Je zdrojem elektromagnetického vlnění. To je monochromatické, koherentní a vysoce směrové.

Součástí každého laseru je rezonátor, aktivní prostředí a zdroj energie. Specifikem laserových diod je právě materiál pro jejich konstrukci – polovodič. Rezonátor může být tvořen dvěma rovinnými zrcadly, mřížkami nebo odštěpením krystalu polovodiče v určité ose.

Mezi jeden z velmi důležitých parametrů polovodičových laserů se řadí prahový proud  $I_p$ . Jde o proud, jehož překročením se laserová dioda dostává do laserového režimu. Další důležitý popis laserové diody nám udává L-I charakteristika – závislost výstupního výkonu na prahovém proudu.

Rozebrali jsme dva způsoby řízení optického výkonu. Výkon lze řídit nepřímo pomocí proudu a teploty nebo přímo pomocí monitorovací fotodiody. Volba systému záleží na použití laserové diody. Monitorovací fotodioda často přináší do řídicí smyčky šum, a proto není příliš vhodná k aplikacím, kde bychom vyžadovali velmi přesnou hodnotu a vysokou stabilitu optického výkonu.

Většina popisovaných řídicích obvodů umožnila oba způsoby řízení – konstantní proud i konstantní výkon. Obvody, které dovedly laserovou diodu budit proudem v řádu jednotek A, by měly větší využití pro výkonovější diody. Pro nízkovýkonové laserové diody se jevil jako vhodný obvod FL500 díky vysoké stabilitě budícího proudu. Většina obvodů poskytovala i různé způsoby ochrany laserové diody. Některé obvody nabízely možnost přivedení externího modulačního signálu.

Jako výborné řešení „vše v jednom“ se ukázaly profesionální řídicí platformy. Jejich vysoká pořizovací cena a velmi široké možnosti nastavení je ale spíše předurčují pro testování laserových diod než pro jejich stálý provoz v jediné aplikaci.

Tab. 3 Přehled řídicích obvodů a některých jejich parametrů a vlastností

obvod	max. $I_{budicí}$ [mA]	řízení proudu - stabilita		ochranné prvky	externí modulace
		krátkodobá (1 h)	dlouhodobá (24 h)		
WLD 3343	3000	200 ppm	X	ANO	NE
LTC 1923	X	X	X	ANO	NE
LDA1-CP1	2000	0,05 RMS při 2000 mA		ANO	NE
iC-NZP	300	X	X	ANO	NE
MAX 3946	80	max. 3% z nastavené hodnoty		ANO	ANO
SY 88422L	100	X	X	NE	ANO
PLD série	200/500/1250/5000/ 6500 <sup>1)</sup>	< 100 ppm (< 200 ppm <sup>3)</sup> )	X	ANO	ANO
FL500	250/500 <sup>2)</sup>	< 40 ppm	< 75 ppm	ANO	NE
<b>profesionální platformy</b>					
LDC 500	100	< 5 ppm	< 15 ppm	ANO	ANO
LDC 3200	100/500/4000 <sup>1)</sup>	< 10 ppm <sup>4)</sup>	< 20 ppm <sup>4)</sup>	ANO	ANO

<sup>1)</sup> dle typu

<sup>2)</sup> lze použít jako jeden 500 mA či dva samostatné 250 mA zdroje

<sup>3)</sup> pro typ 5000 mA a 6500 mA

<sup>4)</sup> pro typ 100 mA

X není dostupný či výrobce neuvádí

Aplikace laserových diod v praxi je velmi široká. Setkáme se s nimi v telekomunikačních sítích, v průmyslu, v lékařství, v kancelářském vybavení, v měřicích a detekčních přístrojích, ve vojenské technice a spoustě dalších odvětví lidské činnosti.

## Použitá literatura

- [1] PASCHOTTA, Rüdiger. An Open Access Encyclopedia for Photonics and Laser Technology. In: [online]. [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [2] LUKÁŠ, Michal. *Světlo: Laserové Diody*. Praha: FCC Public, 2005, čísla 1,2,3,6.
- [3] HÁBOVČÍK, Peter. *Lasery a fotodetektory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990, 318 s. ISBN 80-050-0526-1.
- [4] SALEH, Bahaa E. A. a TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky = Fundamentals of photonics: svazek 3; soubor 4 sv.* 1. vyd. Praha: Matfyzpress, 1995. 4 sv., 437 - 778 s. ISBN 80-85863-05-7.
- [5] Laser diode drivers. *Laser diode driver basics* [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.teamwavelength.com/info/laserdiodedrivers.php>
- [6] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody část 3.: Parametry laserových diod a jejich měření. *Elektrorevue* [online]. 2002, roč. 2002 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023>
- [7] WAVENEGTH ELECTRONICS INC. *WLD3343 Series General Purpose Laser Diode Driver Datasheet* [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.teamwavelength.com/downloads/datasheets/wld3343.pdf#page=1>
- [8] Peltier effect. In: *Encyclopedia Britannica* [online]. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/449424/Peltier-effect>
- [9] LINEAR TECHNOLOGY INC. *Linear Technology: LTC 1923* [online]. 2001 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1923f.pdf>

- [10] ANALOG TECHNOLOGIES, Inc. *LDA1-CP1* [online]. 2012 [cit. 2012-05-19].  
Dostupné z: <http://www.analogtechnologies.com/document/LDA1-CP1.pdf>
- [11] IC-HAUS GMBH. *IC-NZP* [online]. 2011 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z:  
[http://www.ichaus.de/upload/pdf/NZP\\_datasheet\\_B1en.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/NZP_datasheet_B1en.pdf)
- [12] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. *MAX 3946* [online]. 2011 [cit. 2012-05-19].  
Dostupné z: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX3946.pdf>
- [13] MICREL INC. *SY88422L* [online]. 2007 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z:  
[http://www.micrel.com/\\_PDF/HBW/sy88422l.pdf](http://www.micrel.com/_PDF/HBW/sy88422l.pdf)
- [14] WAVENEGTH ELECTRONICS INC. *PLD Series Laser Diode Driver Datasheet*  
[online]. 2011 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z:  
<http://www.teamwavelength.com/downloads/datasheets/pldseries.pdf#page=1>
- [15] WAVENEGTH ELECTRONICS INC. *FL500 Dual Channel Laser Diode Driver Datasheet*  
[online]. 2009 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z:  
<http://www.teamwavelength.com/downloads/datasheets/fl500.pdf#page=1>
- [16] FL591FL Evaluation PCB & FL500 Laser Diode Driver. WAVENEGTH  
ELECTRONICS INC. *Wavelength Electronics* [online]. 2008-2012 [cit. 2012-05-22].  
Dostupné z: <http://www.teamwavelength.com/products/product.php?part=149>
- [17] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody část 4.: Napájení, impulsní režim a aplikace  
laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2002, roč. 2002, [cit. 2012-05-09]. Dostupné z:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/index.html>
- [18] STANFORD RESEARCH SYSTEMS. *Laser diode Controllers: LDC 500 Series*  
[online]. 2011 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z:  
<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Catalog/LDC500c.pdf>
- [19] ILX LIGHTWAVE. *3200\_brochure\_REV04.indd* [online]. 2012 [cit. 2012-05-23].  
Dostupné z: [http://www.ilxlightwave.com/pdfs/3200\\_brochure\\_REV04.pdf](http://www.ilxlightwave.com/pdfs/3200_brochure_REV04.pdf)



[20] Direct industry: The virtual industrial exhibition. *Laser diode driver* [online]. 2012 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/laser-diode-driver-77999.html>

[21] Spectrump.gif. In: *Elektrorevue* [online]. 2002 [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/spectrump.gif>

[22] Laser.svg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007 [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Laser.svg>

[23] SUK, Martin. *Výkonová stabilizace laserových diod* [online]. Brno, 2007 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: [http://www.engis.ic.cz/download/diplomova\\_prace\\_dokument.pdf](http://www.engis.ic.cz/download/diplomova_prace_dokument.pdf). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

[24] 1225583.gif. *Newport* [online]. 2011 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://assets.newport.com/web600w-EN/images/1225583.gif>