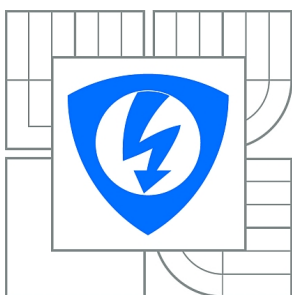


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

STUDIUM INTENZITNÍHO PROFILU OPTICKÝCH SVAZKŮ

OPTICAL BEAM INTENSITY PROFILE ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

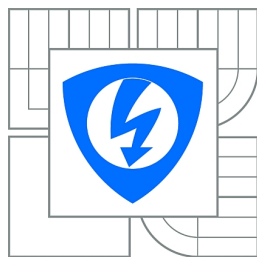
Bc. JAKUB FOJTÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETER BARCÍK

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jakub Fojtík

ID: 125421

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Studium intenzitního profilu optických svazků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s matematickým popisem optických svazků generovaných různými zdroji záření. Pomocí vhodného počítačového programu vytvořte model, který simuluje reálný kruhově symetrický svazek v ideálním bezstrátovém, stacionárním, homogenním a izotropním prostředí. Navrhněte metodu měření intenzitního profilu svazku pro využití v optických bezkabelových komunikacích.

V experimentální části práce měřicí aparaturu realizujte a ověřte její funkčnost. Proměřte dosažené parametry měřicí aparatury a porovnejte je se současně komerčně dostupnými systémy. Experimentálně ověřte platnost modelů vypracovaných v teoretické části.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995.

[2] MAJUMDAR, A. K., RICKLIN, J. C. Free-Space Laser Communications: Principles And Advances. New York: Springer, 2007.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Peter Barcík

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zkoumáním intenzitního profilu optických svazků. Na úvod je tato problematika optických svazků popsána teoreticky. V programu Matlab® je vytvořen model reálně kruhového symetrického svazku v ideálním bezztrátovém, stacionárním, homogenním a izotropním prostředí. Další část této práce se zabývá samotnou realizací automatického pracoviště pro měření intenzitního profilu optických svazků. Jedná se o návrh plošného spoje s funkcí fotodetektoru v programu Eagle®, realizaci plošného spoje, naprogramování procesoru Atmega16, vytvoření uživatelské aplikace v Microsoft Visual Studiu 2010® pro ovládání posuvu M – IMS 400 a komunikaci s navrženým fotodetektorem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Atmega16, fotodetektor, gaussovský svazek, laser, optický svazek, posuv M – IMS 400

ABSTRACT

This work is focused on the study of the intensity profile of optical beams. In the first part problematics of optical beams from theoretical point of view is discussed, Model of realistically circular symmetric beam in an ideal lossless, stationary, homogeneous and isotropic medium is formed in Matlab®. The next part of the thesis deals with implementation of automatic workplace for measuring intensity profile of optical beams. Within the thesis - PCB desing of photodetector in Eagle®, is discussed. Custom application for controlling the motorized linear stage M – IMS 400 and communication with photodetector in the Microsoft Visual Studio 2010® was created.

KEYWORDS

Atmega16, photodetector, gaussian beam, laser, optical beam, motorized linear stage M – IMS 400

FOJTÍK, J. *Studium intenzitního profilu optických svazků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 48 s., 14 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Peter Barčík

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Studium intenzitního profilu optických svazků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Peteru Barčíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Teorie laseru	2
1.1 Dvouhladinový systém	2
1.2 Tříhladinový systém	3
1.3 Plynové lasery	5
1.3.1 He-Ne laser (laser s neutrálními atomy)	5
1.3.2 He-Cd laser (laser s parami kovů)	6
1.3.3 Ar^+ laser (iontový laser)	6
1.4 Plynové lasery – molekulové	6
1.4.1 Dusíkový laser	6
1.4.2 Excimerové lasery	6
1.4.3 CO_2 laser	7
1.5 Pevnolátkové lasery	7
1.5.1 Rubínový laser	7
1.5.2 Neodymový laser	7
1.6 Kapalinové lasery	8
1.6.1 Barvivový laser (Dye laser)	8
1.7 Polovodičové lasery a fotodiody	8
1.7.1 Laserová dioda	8
1.8 Fotodiody	9
1.8.1 Fotodiody typu PIN:	9
1.8.2 Fotodiody APD:	10
2 Optické svazky	11
2.1 Gaussovský svazek	11
2.1.1 Vlastnosti gaussovského svazku	12

2.2	Průchod gaussovského svazku optickými prvky	14
2.2.1	Průchod tenkou čočkou.....	14
2.2.2	Tvarování svazku	15
2.2.3	Odraz na sférickém zrcadle.....	15
2.2.4	Průchod libovolnou optickou soustavou.....	16
2.3	Hermiteovské – Gaussovske svazky	17
2.4	Laguerreovské - Gaussovske a Besselovské svazky.....	18
3	Simulace Gaussova svazku pomocí Matlabu	19
4	Komerčně dostupné systémy pro měření parametrů optických svazků	27
4.1	μBeam profiler	28
4.2	LaserCam – HR – fa Coherent.....	28
4.3	LBA – FW – SCOR – fa Spiricon	29
4.4	NIST – Traceable – fa Photon	29
4.5	FireWire(IEEE 1394) – fa Photon	29
4.6	Laser Bema Profilers – fa Newport	29
5	Metoda měření intenzitního profilu svazku pro využití v optických bezkabelových komunikacích	30
5.1	Fotodioda	31
5.2	LM 324	33
6	Návrh fotodetektoru	34
6.1	A/D převod	34
6.2	ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA	34
6.3	Realizace fotodetektoru:	36
7	Program pro ovládání POSUVU M – IMS 400 a řízení procesoru ATmega16	40
7.1	Obslužný program pro PC	41
7.2	Popis programu mikrokontroléru.....	42
8	Ověření metody pro Měření intenzitního profilu optických svazků	45
8.1	Měření pomocí fotodetektoru	45
9	Závěr	48
	Literatura	49
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	51

Přílohy	52
Seznam příloh	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Působení rovinné monochromatické optické vlny na dvouhladinový systém [1]	2
Obr. 1.2 Energetické hladiny a přechody částic v tříhladinovém systému [1]	3
Obr. 1.3 Energetické hladiny a přechody aktivních částic u čtyřhladinového systému [1]	5
Obr. 1.4 Typické výkonové charakteristiky LED a LD [1]	8
Obr. 1.5 V – A charakteristika fotodiody [1]	9
Obr. 2.1 Závislost normované intenzity I/I_0 na podélné souřadnici z [2]	13
Obr. 2.2 Transformace gaussova svazku libovolnou soustavou, která je popsána maticí ABCD [2]	17
Obr. 2.3 Hermiteovy – gaussovy funkce [2]	17
Obr. 2.4 Příčný profil intenzity bessellovského a gaussova svazku [2]	18
Obr. 3.1 Okno vytvořeného programu	23
Obr. 3.2 Vývojový diagram vytvořeného programu	23
Obr. 3.3a Gaussův svazek v počátku oblasti šíření	24
Obr. 3.3b Gaussův svazek v počátku oblasti šíření (pohled shora)	25
Obr. 3.4a Gaussův svazek na konci oblasti šíření	25
Obr. 3.4b Gaussův svazek na konci oblasti šíření (pohled shora)	26
Obr. 4.1 μ Beam profiler (ilustrační foto) [18]	27
Obr. 5.1 M – IMS 400 [3]	30
Obr. 5.2 Blokové schéma metody	31
Obr. 6.1 Rozložení pinů u Atmega16 [10]	35
Obr. 6.2 Blokové schéma Atmega16 [10]	36
Obr. 6.3 Schéma vstupního napájecího obvodu	37
Obr. 6.4 Fotodioda BPW34 (ilustrační foto) [14]	37
Obr. 6.5 Závislost závěrného proudu na osvitu fotodiody [14]	38
Obr. 6.6 Asynchronní přenos dat [13]	38
Obr. 6.7 Propojení fotodetektoru s konektorem RS232 přes obvod MAX 232	39
Obr. 7.1 Vývojový diagram: Snímání intenzity světelného záření	40
Obr. 7.2 Blokové schéma pracoviště	41
Obr. 7.3 Okno uživatelské aplikace	42
Obr. 7.4 Registr ADMUX [10]	43

Obr. 7.5 Registr ADCSRA [10].....	44
Obr. 7.6 Registr UCSRB [10].....	44
Obr. 7.7 Registr UCSRC [10].....	44
Obr. 8.1 Profil laserového svazku (633 nm).....	46
Obr. 8.2 Profil rozšířeného laserového svazku (633 nm)	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Svazek má parametry:	22
Tab. 3.2: Ukázka zadaných hodnot.....	24
Technické údaje: [15]	28
Technické údaje: [15]	28
Technické údaje: [15]	29
Technické údaje: [15]	29
Technické údaje: [15]	29
Technické údaje: [15]	29
Tab. 5.1: Technické parametry fotodiody [14]	31
Tab. 5.2 A: Vlastnosti fotodiody	32
Tab. 5.2 B: Vlastnosti fotodiody.....	32
Tab. 5.2 C: Vlastnosti fotodiody.....	32
Tab. 5.3: Parametry LM 324 [16]	33

ÚVOD

Cílem této práce je navržení metody pro studium intenzitního profilu optických svazků. V práci je tato problematika rozebrána nejdříve teoreticky, popsána matematickými a fyzikálními rovnicemi. Pomocí programu MATLAB® je namodelován reálný kruhově symetrický svazek v ideálním bezztrátovém, stacionárním, homogenním a izotropním prostředí. Další část práce pojednává o konstrukci plně automatizovaného pracoviště, aby veškerá činnost týkající se měření intenzitního profilu optických svazků mohla být prováděna z PC. Uživatel bude ve vytvořeném programu ovládat posun posuvného ramene, na kterém bude připevněn fotodetektor a zároveň zde bude také zpracovávat naměřená data z fotodetektoru.

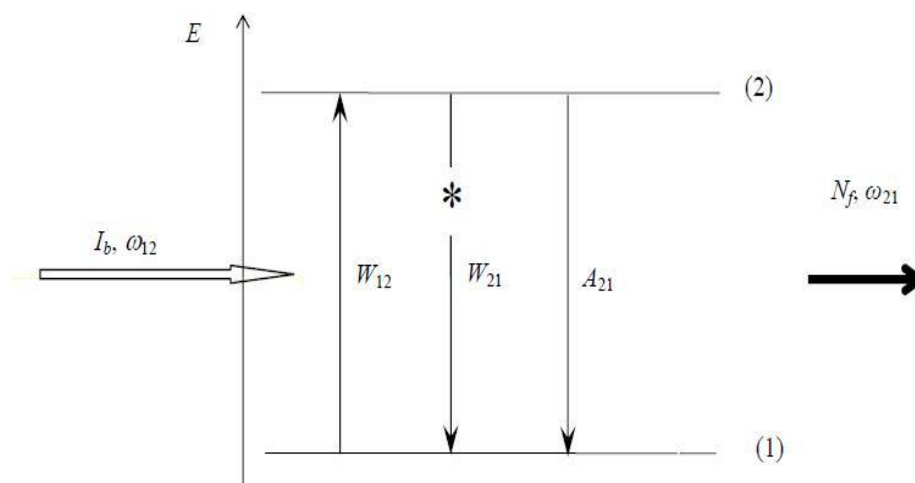
Takto navržené a zkonstruované pracoviště bude k dispozici ve školní laboratoři Ústavu radioelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT Brno, pro výuku laboratorních cvičení zabývajících se optickou komunikací.

1 TEORIE LASERU

V úvodní kapitole jsou popsány druhy laserů a u každého druhu jsou představeny nejpoužívanější lasery. Dále je zde rozebrána teorie popisující funkci laserové diody a fotodiody. Teorie, obrázky a matematicko-fyzikální vztahy jsou čerpány z [1].

1.1 Dvouhladinový systém

O dvouhladinovém systému mluvíme ve spojitosti, pokud látku lze modelovat za pomoci přechodů mezi dvěma energetickými stavy. Na aktivní látku působí rovinná monochromatická optická vlna, která má frekvenci ω_{12} a intenzitou I_b (viz. Obr. 1.1).



Obr. 1.1 Působení rovinné monochromatické optické vlny na dvouhladinový systém [1]

Pro koncentraci částic N_1, N_2 platí zákon zachování počtu částic [1]

$$N_1 + N_2 = N_{\Sigma} = \text{konst.} \quad (1.1.1)$$

Rychlost změny koncentrace druhé hladiny aktivní látky je popsána kinetickou rovnicí

$$\frac{dN_2}{dt} = W(N_1 - N_2) - \frac{1}{\tau_{21}} N_2. \quad (1.1.2)$$

Hustotu pravděpodobnosti indukovaných přechodů pak můžeme zapsat jako

$$W_{12} = W_{21} = W. \quad (1.1.3)$$

Hustota pravděpodobnosti spontánních přechodů

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}},$$

τ_{21} střední doba života částic. (1.1.4)

Rozdíl obsazení energetických hladin se určí jako

$$N_1 - N_2 = \Delta N. \quad (1.1.5)$$

Hustota pravděpodobnosti indukovaného přechodu W je úměrná spektrální objemové hustotě w_ω

$$W = Bw_\omega,$$

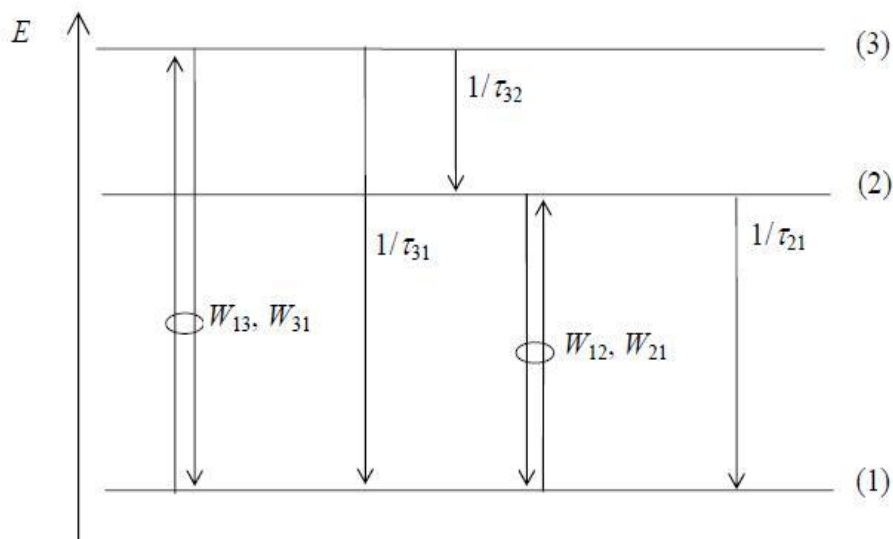
kde B je Einsteinův koeficient indukovaného přechodu. (1.1.6)

Při extrémně vysokých hodnotách w_ω klesá ΔN k nule a nastává tzv. stav nasycení

$$N_1 = N_2 = \frac{N_\Sigma}{2}. \quad (1.1.7)$$

1.2 Tříhladinový systém

Pro získání inverzního rozložení aktivních částic je potřebný systém s více než dvěma hladinami. Proto bude nyní rozebrán tříhladinový systém (Obr. 1.2).



Obr. 1.2 Energetické hladiny a přechody částic v tříhladinovém systému [1]

Proces buzení tříhladinového systému se zapíše následovně [1]

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - W_{31}N_3 - \frac{1}{\tau_{31}}N_3 - \frac{1}{\tau_{32}}N_3, \quad (1.2.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{1}{\tau_{21}}N_2 + \frac{1}{\tau_{32}}N_3. \quad (1.2.2)$$

Platí samozřejmě zákon zachování počtu částic

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_{\Sigma} = \text{konst} ; \quad (1.2.3)$$

$$N_3 \ll N_1, N_2. \quad (1.2.4)$$

Platí-li $N_2 > N_1$, musí i zároveň platit, že

$$W_{13} > \frac{1}{\tau_{21}}. \quad (1.2.5)$$

To je jedna z podmínek dosažení inverzního obsazení mezi hladinami (2) a (1) u tříhladinového systému. Veličina W_{13} bývá nazývána hustota pravděpodobnosti buzení, někdy se taky označuje jako W_b .

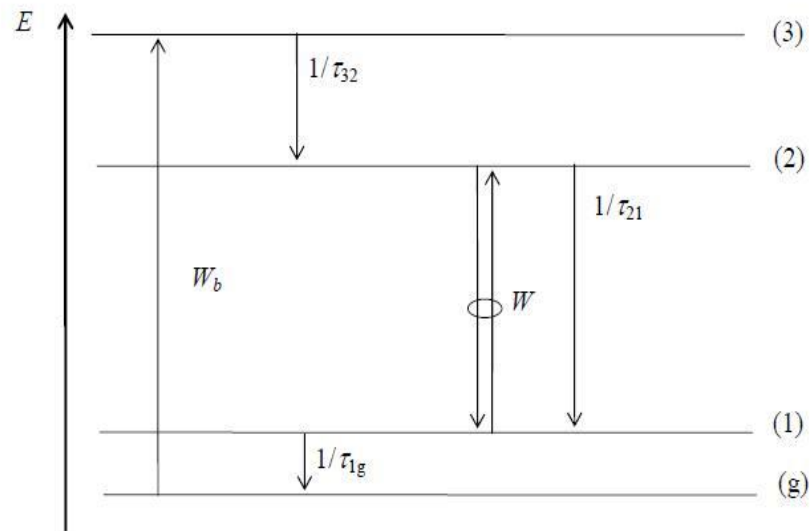
U inverzního obsazení hladin aktivní látky se začne pro optickou vlnu projevovat zesilovací účinek. Toto lze vyjádřit tzv. Bouguerovým-Lambertovým-Beerovým zákonem

$$dI_b = \beta I_b dl, \quad (1.2.6)$$

β představuje koeficient zesílení.

1.3 Plynové lasery

Energetické hladiny čtyřhladinový systém s typickými přechody aktivních částic ukazuje Obr. 1.3.



Obr. 1.3 Energetické hladiny a přechody aktivních částic u čtyřhladinového systému [1]

Pro splnění inverzního obsazení je nutné splnit [1]

$$\frac{1}{\tau_{32}} \gg \frac{1}{\tau_{21}}, \frac{1}{\tau_{31}}, \frac{1}{\tau_{3g}}; \quad (1.3.1)$$

$$N_3 \ll N_2 + N_1 + N_g, \quad (1.3.2)$$

pak

$$W_{13} > \frac{1}{\tau_{21}}.$$

Kinetická rovnice pro ΔN_i

$$\frac{d(\Delta N_i)}{dt} = W_b (N_\Sigma - \Delta N_i) - B_f N_f \Delta N_i - \frac{1}{\tau_{21}} \Delta N_i = 0. \quad (1.3.3)$$

1.3.1 He-Ne laser (laser s neutrálními atomy)

Buzení He-Ne laseru probíhá pomocí elektrického výboje v plynu (He) a následnými srážkami atomů He s atomy Ne. He-Ne lasery mohou pracovat na různých vlnových délkách oranžová, žlutá, infračervené, červené a další. Výběr vlnové délky se provádí pomocí selektivních zrcadel. Výkon je 10^{-1} mW až 10^2 mW. Tyto lasery se používají k zaměřování objektů, v holografii, k měření vzdálenosti a spektroskopickým měřením.

1.3.2 He-Cd laser (laser s parami kovů)

Buzení He-Cd laseru probíhá podobným způsobem jako u He-Ne laseru. Opět dochází k elektrickému výboji v plynu He a následným srážkám atomů He s atomy Cd. He-Cd laser pracuje na dvou vlnových délkách, modré a UV záření. He-Cd lasery se používají při vědeckých experimentech, především v oblasti, kde dochází k interakci záření s látkou. Tyto lasery mají své uplatnění také díky svému výkonu, ten je relativně vysoký. V cw-režimu mají výkon kolem stovky mW.

1.3.3 Ar⁺ laser (iontový laser)

Buzení probíhá opět elektrickým výbojem a následnými srážkami elektronů s ionty argonu. Při tomto typu buzení však vznikají velké proudové hustoty, což způsobuje značný tok i samotného plynu. Ar⁺ laser pracuje v oblasti zelené a modré vlnové délky. U Ar⁺ laserů se v cw-režimu ve viditelné oblasti spektra dosahuje výkonů, až 500 W. Tyto lasery mají své uplatnění v lékařství (chirurgie) nebo při vědeckých experimentech (výzkum atmosféry).

1.4 Plynové lasery – molekulové

V této kapitole budou představeny tři typy molekulových laserů. Jde o dusíkové lasery, excimerové lasery a CO₂ lasery. Při zkoumání energetických hladin se pozornost soustředí na vzdálenost mezi atomy molekuly, rotace molekuly jako celku a na vibrace molekuly. Je dobré předpokládat, že molekula je tvořena dvěma identickými atomy.

1.4.1 Dusíkový laser

U dusíkových laserů probíhá buzení elektrickým výbojem v plynu N₂ a srážkami molekuly N₂ s elektrony. Dusíkový laser pracuje pouze v impulsním režimu, protože není splněna podmínka cw-režimu¹. Jeho pracovní vlnová délka je 337,1 nm. Dusíkový laser se používá pro buzení jiných laserů, díky své krátké vlnové délce, a navíc jeho sestavení je také poměrně snadné. Díky dostatečně vysokému koeficientu zesílení postačí v konstrukci laseru jen jedno zrcadlo. Výkon tohoto typu laseru bývá 1 MW, při délce impulse asi 10 ns.

1.4.2 Excimerové lasery

Pro excimerové lasery jsou aktivním prostředím dvouatomové molekuly, tzv. dimery. Tyto tzv. dimery existují pouze ve vybuzeném stavu, ten se nazývá excimer. V základním nevybuzeném stavu se tyto molekuly rozpadají na dílčí atomy. Buzení je vyvoláno elektronovým svazkem. Střední pracovní vlnová délka je 173 nm s šířkou spektrální čáry 5 nm. Excimerové lasery mohou pracovat pouze v impulsním režimu s výkonem kolem 100 W. Jejich využití je především v chirurgii. Používají se ale při dělení izotopů, při buzení barvivových laserů a zkoumá se i jejich využití v termojaderné syntéze.

¹ Podmínka pro kontinuální „cw” režim: $\tau_{1g} < \tau_{21}$.

1.4.3 CO₂ laser

Aktivní prostředí se skládá z několika plynů, ale stimulovaná emise probíhá pouze u CO₂. Existuje několik způsobů buzení CO₂ laserů:

- a) dynamické buzení (impulsní režim)
- b) podélné buzení elektrickým výbojem (cw režim)
- c) příčné buzení elektrickým proudem (cw režim a impulsní režim)

Pracovní délky jsou 9,6 μm nebo 10,6 μm. Šířka spektrální čáry je 50 MHz. CO₂ lasery mají široké uplatnění, např. vojenství, telekomunikace, radary, dálkoměry, spektroskopie a další. CO₂ lasery s vlnododovým uspořádáním jsou vhodné pro komunikační účely, jako zdroje nosné vlny. CO₂ lasery pracující v cw režimu se dělí na:

- nízkovýkonové – vlnododové, výkon 10⁻³ W až 10 W
- vysokovýkonové – podélně buzené, výkon 10 W až 100 W
- vysokovýkonové – příčně buzené, výkon až 10 kW

CO₂ lasery pracující v impulsním režimu se dělí na:

- příčně buzené – výkon 1 GW
- buzené rychlým ochlazením předehřátého plynu, výkon 1 GW

1.5 Pevnolátkové lasery

Skupina pevnolátkových laserů je charakterizována dvěma typy laserů, které patří do této skupiny. Jedná se o rubínový laser a neodymový laser. Vlastnosti celé skupiny pak vyplývají z vlastností uvedených dvou laserů.

1.5.1 Rubínový laser

Buzení rubínového laseru může probíhat v modré nebo zelené oblasti spektra. V zelené oblasti se využívá xenonová výbojka, v modré oblasti pak rtuťová výbojka. V impulsním režimu dosahují výkonu desítek MW až jednotek GW. V cw režimu potom jednotky W. Jeho využití je především v dálkoměrných systémech. Pro jeho využití může být důležité, že tento laser září v červené oblasti spektra.

1.5.2 Neodymový laser

Buzení neodymového laseru je podle Xe impulsní výbojky. Neodymové lasery se používají ve vojenství, k měření vzdáleností objektů a k opracovávání materiálu.

1.6 Kapalinové lasery

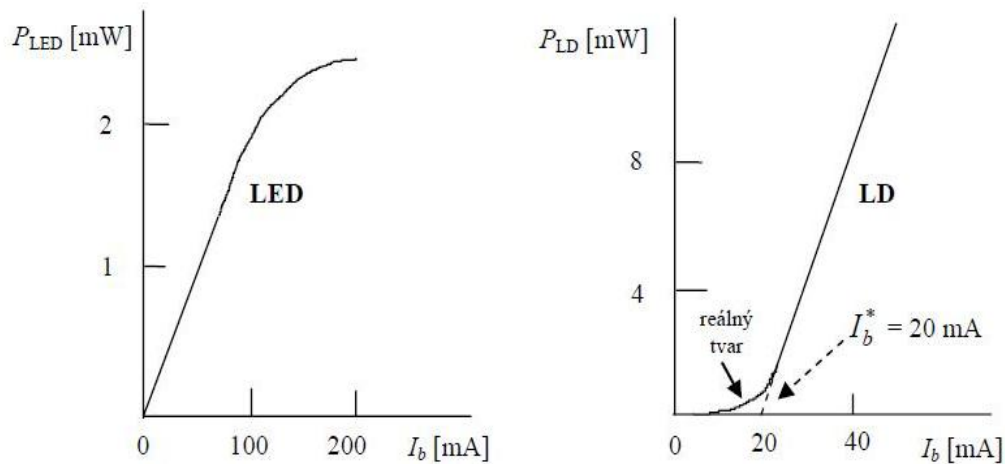
1.6.1 Barvivový laser (Dye laser)

Kapalinový laser je buzen optickým zářením. V impulsním režimu dosahuje výkonu 10^5 W. V kontinuálním režimu jednotek W. Využití je v oblasti spektroskopie a v oblasti zkoumání čistoty ovzduší.

1.7 Polovodičové lasery a fotodiody

1.7.1 Laserová dioda

Laserové diody vyzařují optický výkon z relativně malé plošky. Nejvýznamnější použití laserových diod je v optických komunikacích, kde slouží jako zdroje nosné vlny. Dále se používají v čtečkách čárového kódu, laserových tiskárnách a dalších aplikacích.



Obr. 1.4 Typické výkonové charakteristiky LED a LD [1]

Rozdíl uvedených dvou charakteristik spočívá v nelinearitě polovodičového laseru pro malé hodnoty budícího proudu. Změny budícího proudu musí totiž obsahovat stejnosměrnou složku.

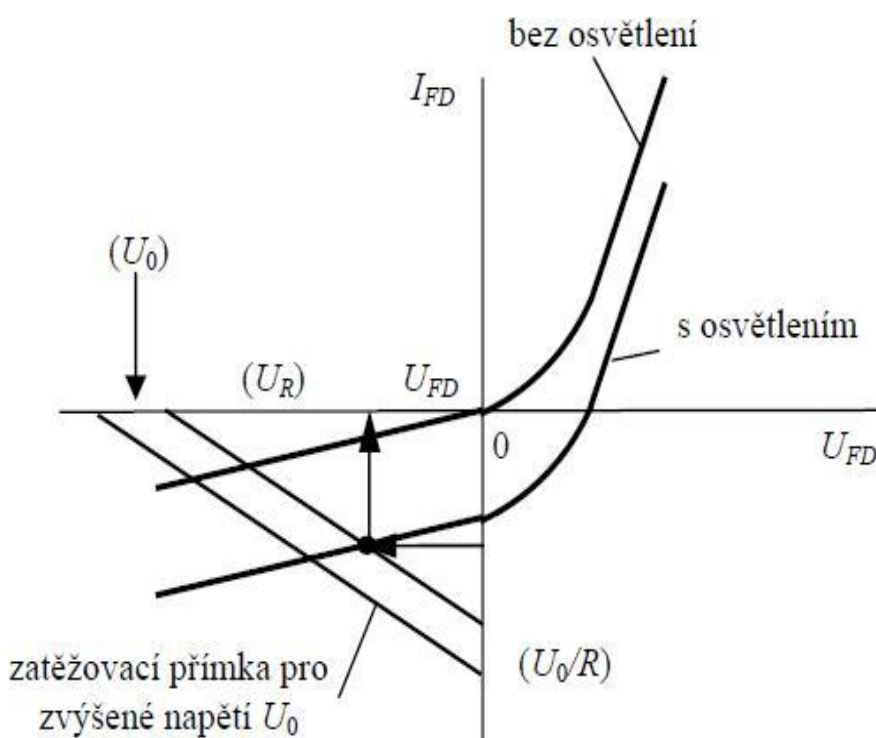
Z hlediska struktury se dělí na:

- homostrukturní
- heterostrukturní
- s rozloženou zpětnou vazbou
- s kvantovými jámami

Laserové diody mohou mít ve svém pouzdru zabudovanou fotodiodu, která detekuje vyzářený optický výkon. Laserové diody mohou vyzařovat hranově nebo plošně.

1.8 Fotodioda

U optického systému má fotodioda uplatnění hlavně v přijímací části, kde je součástí detektorů, které detekují dopadající světelné paprsky. Ty jsou poté vhodně upravovány za použití zesilovače, demodulátoru a poté dále zpracovány. Používají se především ve vysílacích částech optických systémů. Fotodiody jsou vyráběny z různých materiálů, závisí to vždy na pásmu, v jakém chceme fotodiodu používat. Nejčastěji používanými materiály jsou tedy AlGaAs/GaAs, InGaAs/InP, HgCdTd/CdTe, GaAlAsSb/GaSb.



Obr. 1.5 V – A charakteristika fotodiody [1]

1.8.1 Fotodiody typu PIN:

Tento typ fotodiody má mezi vrstvami P a N umístěnu ještě vrstvu I (intrinsická vrstva, slabě dotovaná). Díky tomu se dosáhne rozšíření aktivní oblasti pro příjem fotonů. Doby náběhu u tohoto typu fotodiody jsou udávány v ps.

1.8.2 Fotodiody APD:

Ještě většího zesílení lze dosáhnout dalším rozšířením vrstvy I a současným zvýšením přiloženého napětí $U_{0,FD}$. U tohoto typu fotodiody se využívá vnitřního zesílení G_{FD} , které je vyvoláno lavinovým jevem. Uvolněné elektrony jsou po interakci s fotony urychlovány relativně velkým přiloženým napětím ($U_{0,FD} = 100 \text{ V}$) a strhávají k uvolnění další elektrony. Fotodiody jsou pak nazývány lavinové fotodiody (APD; avalanche photodiode). Pro napájení APD diod je potřeba zdroj s relativně velkými a stabilními hodnotami napětí. Ve srovnání s fotodiodami PIN vyžadují APD fotodiody složitější elektronické obvody, avšak doby náběhu jsou srovnatelné u obou fotodiod.

2 OPTICKÉ SVAZKY

Následující kapitola je zaměřena na teorii popisující vlastnosti optických svazků [2].

Světlo se může šířit ve formě svazků. Tyto svazky jsou prostorově nedivergentními a prostorově lokalizovatelnými vlnami. Optické svazky vycházejí z řešení Helmholtzovy rovnice. Jedním z řešení paraxiální Helmholtzovy rovnice je vlna, která se nazývá gaussovský svazek. Tato vlna má vlastnosti optického svazku. Za paraxiální vlnu považujeme vlnu, jejíž normály vlnoploch svírají s osou z malý úhel.

2.1 Gaussovský svazek

Gaussovský svazek je vlna, která má vlastnosti optického svazku. Je dalším řešením parciální Helmholtzovy rovnice. Detailněji bude tato problematika vysvětlena pomocí matematických rovnic. Poloměr svazku je $\sqrt{2}$ -krát větší než středový poloměr. Intenzita v ose svazku je $\sqrt{2}$ -krát menší než maximální intenzita. Fáze v ose svazku je o $\pi/4$ zpožděna vzhledem k fázi rovinné vlny. Poloměr křivosti vlnoplochy dosahuje minima, tedy $R = 2z_0$.

Matematicky lze gaussovský svazek popsat následujícím způsobem. Pro jeho komplexní amplitudu platí: [2]

$$U(r) = A(r) \exp(-jkz). \quad (2.1.1)$$

Pro komplexní amplitudu $U(r)$ musí být splněna Helmholtzova rovnice

$$\nabla_T^2 A - j2kx \frac{\partial A}{\partial z} = 0. \quad (2.1.2)$$

V této rovnici ∇^2 představuje příčnou část Laplaceova operátoru.

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left[-jk \frac{q^2}{2q(z)}\right], \quad q(z) = z + jz_0. \quad (2.1.3)$$

Výraz z_0 je definován jako Rayleighova vzdálenost. Pro oddělení amplitudy a fáze, uvedené komplexní obálky, si zavedeme nové dvě reálné funkce $W(z)$ a $R(z)$. $W(z)$ představuje pološířku svazku a $R(z)$ poloměr křivosti.

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi W^2 R(z)}. \quad (2.1.4)$$

Finální podoba komplexní amplitudy gaussovského svazku má potom tvar

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right] \times \exp\left[-jkz - jk \frac{\rho}{2R(z)} + j\zeta(z)\right]. \quad (2.1.5)$$

Parametry svazku jsou pak popsány následovně

$$W(z) = W_0 [1 + (\frac{z}{z_0})^2]^{1/2}, \quad (2.1.5a)$$

$$R(z) = z [1 + (\frac{z_0}{z})^2], \quad (2.1.5b)$$

$$W_0 = (\frac{\lambda z_0}{\pi})^{1/2}, \quad (2.1.5c)$$

$$\zeta(z) = \arctan \frac{z}{z_0}. \quad (2.1.5d)$$

2.1.1 Vlastnosti gaussovského svazku

Nyní budou popsány jednotlivé vlastnosti gaussovského svazku, od jeho výkonu, intenzity až po poloměr svazku, ohniskovou hloubku a jeho vlnoplochy.

Výkon svazku

Optický výkon gaussova svazku je soustředěn do úzkého svazku kužele. Optická intenzita je v rovině kolmé na směr šíření dána kruhově symetrickou gaussovou funkcí. Celkový výkon přenášený svazkem je dán integrálem součinu intenzity záření a plochy příčného průřezu svazku [2]

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi \rho d\rho, \quad (2.1.1.1)$$

potom

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2). \quad (2.1.1.2)$$

Výkon svazku je tedy dán poloviční hodnotou součinu maximální intenzity s plochou kruhu o poloměru rovnajícím se středové pološířce svazku.

Intenzita svazku

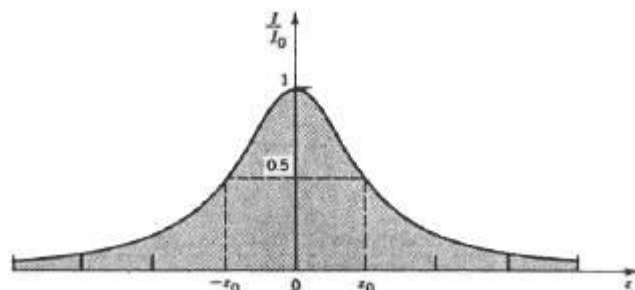
$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right]. \quad (2.1.1.3)$$

Vlna se nazývá gaussovský svazek, protože pro každou hodnotu z je intenzita gaussovskou funkcí radiální vzdálenosti ρ . Gaussova funkce dosahuje své největší hodnoty při $\rho = 0$ (na ose z) a poté se vzrůstajícím ρ monotónně klesá. Pološířka gaussovského rozložení $W(z)$ zase narůstá s axiální vzdáleností z . Na ose svazku ($\rho = 0$) můžeme intenzitu gaussova svazku vyjádřit jako

$$I(0, z) = \frac{I_0}{1 + (z/z_0)^2}, \quad (2.1.1.4)$$

pro $z = 0$ dosahuje maximální hodnoty I_0 , s rostoucím z spojitě klesá. V případě, že $z =$

$\pm z_0$ dosahuje polovinu své maximální hodnoty I_0 . Pro $z \gg z_0$ pak intenzita $I(0,z) \approx I_0 z_0^2/z^2$ a intenzita klesá s kvadrátem vzdálenosti z . Vůbec nejvyšší hodnota intenzity $I(0,0) = I_0$ je ve středu svazku ($z = 0, \rho = 0$). Vzdálenost okraje svazku od osy svazku se nazývá pološířka svazku. Pološířka svazku se označuje w . Nejužší místo svazku se nazývá krček svazku, označovaný w_0 .



Obr. 2.1 Závislost normované intenzity I/I_0 na podélné souřadnici z [2]

Divergence svazku a divergenční úhel

Divergence svazku je dána úhlem [2]

$$\theta_\theta = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0}. \quad (2.1.1.5)$$

Je to úhel, který svírá asymptota hyperboly s osou svazku. Ve velké vzdálenosti od středu svazku ($z \gg z_0$) vzrůstá poloměr svazku přibližně lineárně, s rostoucím z a vytváří kužel s vrcholovým úhlem $2\theta_\theta$. Tímto kuželem se potom šíří přibližně 86 % výkonu. V případě, že chceme dostat dobře eliminovaný svazek, musíme pracovat s kratší vlnovou délkou a větším středovým poloměrem. V závislosti na souřadnici z , dochází k tzv. Guoyovu efektu, což je vlastně dodatečný fázový posun vlny.

Vlnoplochy svazku

Poloměr křivosti $R(z)$ je v $z = 0$ nekonečný. To odpovídá rovinné vlnoploše. Při rostoucím z nejprve klesá, v případě, že $z = z_0$, dosáhne minimální hodnoty $2z_0$. Právě v tomto bodě má potom vlnoplocha největší křivost. Tomuto místu s největší křivostí se říká Rayleighova vzdálenost. Dále roste se zvětšujícím se z poloměr křivosti a jeho vlnoplochy se stávají téměř sférickými.

Ohnisková hloubka

Axiální vzdálenost, podél které je poloměr svazku roven nebo menší než $\sqrt{2}W_0$ (tj. tam, kde je plocha průřezu svazku rovna nebo menší než dvojnásobek plochy minimálního průřezu), je označován jako ohnisková hloubka nebo též konfokální parametr.

Ohnisková hloubka je rovna dvojnásobku Rayleighovy vzdálenosti

$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda}. \quad (2.1.1.6)$$

Z toho plyne, že ohnisková hloubka je přímo úměrná ploše průřezu svazku, v místě maximálního zúžení a nepřímo úměrná vlnové délce.

Fáze

Ze vztahu (2.1.5) můžeme odvodit výraz pro fázi gaussovského svazku [2]

$$\phi(\rho, z) = kz - \zeta(z) + \frac{k\rho^2}{2R(z)}. \quad (2.1.1.7)$$

Závěrem lze k vlastnostem gaussova svazku konstatovat, že pro popis gaussova svazku je nutné znát několik parametrů. Mezi ně patří maximální amplituda, směr šíření, poloha středu a středová šířka svazku nebo např. Rayleighova vzdálenost.

2.2 Průchod gaussovského svazku optickými prvky

V této kapitole bude diskutována problematika různých optických prvků na šířící se gaussovský svazek.

2.2.1 Průchod tenkou čočkou

Při průchodu gaussovského svazku tenkou čočkou se šířka svazku nezmění, změní se pouze poloměr křivosti vlnoplochy. V případě, že gaussovský svazek prochází tenkou čočkou, musíme využívat následující transformované vztahy: [2]

$$\text{pološířka ve středu} \quad W_0' = MW_0, \quad (2.2.1.1)$$

$$\text{poloha středu} \quad (z' - f) = M^2(z - f), \quad (2.2.1.2)$$

$$\text{ohnisková hloubka} \quad 2z_0' = M^2(2z_0), \quad (2.2.1.3)$$

$$\text{úhlová divergence} \quad 2\theta_0' = \frac{2\theta_0}{M}, \quad (2.2.1.4)$$

$$\text{příčné zvětšení} \quad M = \frac{M_R}{(1 + r^2)^{1/2}}, \text{ kde} \quad (2.2.1.4a)$$

$$r = \frac{z_0}{z - f} \text{ a } M_r = \left| \frac{f}{z - f} \right|. \quad (2.2.1.4b)$$

M – krát se zvětší šířka ve středu svazku, ohnisková hloubka se zvětší M^2 – krát a úhlová divergence se M – krát zmenší.

2.2.2 Tvarování svazku

Při průchodu gaussova svazku jednou nebo více čočkami, můžeme měnit jeho parametry, aniž bychom změnili jeho gaussovský charakter.

Fokusace svazku

V případě, že umístíme čočku do středu gaussova svazku, potom je prošlý svazek fokusován ve vzdálenosti z' do poloměru W_0' . [2]

$$W_0' = \frac{W_0}{[1 + (\frac{z_0}{f})^2]^{1/2}} \quad (2.2.2.1)$$

$$z' = \frac{f}{1 + (\frac{z_0}{f})^2} \quad (2.2.2.2)$$

Když hloubka dopadajícího svazku $2z_0$ je mnohem větší než ohnisková vzdálenost čočky f , tak po drobných úpravách dospějeme ke vztahu

$$W_0' \approx \frac{\lambda}{\pi W_0} f = \theta_0 f \quad (2.2.2.3)$$

$$z' \approx f.$$

Prošlý svazek je fokusován do ohniskové roviny čočky. To je způsobeno tím, že gaussov svazek je ve svém středu dobrou aproximací rovinné vlny.

2.2.3 Odraz na sférickém zrcadle

Komplexní amplitudová odrazivost zrcadla je úměrná $\exp(-jk\rho^2/R)$, kde je podle konvekce $R > 0$ pro konvexní (vypuklé) a $R < 0$ pro konkávní (duté) zrcadlo dojde při odrazu svazku pološířky W_l a o poloměru křivosti R_l ke změně fáze o hodnotu $-k\rho^2/R$, přičemž šířka se nezmění. Odražený svazek zůstane gaussovským.

Tři speciální případy:

- v případě rovinného zrcadla, toto zrcadlo obrátí směr šíření svazku, beze změny poloměru křivosti
- u konkávního zrcadla má odražený svazek záporný poloměr křivosti, vlnoplochy konvergují a svazek je zrcadlem fokusován do menší stopy
- v případě, že svazek má stejný poloměr křivosti jako zrcadlo, vlnoplocha odraženého a dopadajícího svazku koinciduje s povrchem zrcadla, svazek má po odrazu stejný tvar jako před odrazem

2.2.4 Průchod libovolnou optickou soustavou

U parciální aproximace je optická soustava zcela popsána přenosovou maticí 2×2 , která transformuje polohu a směr dopadajícího paprsku na polohu a směr prošlého paprsku.

Zákon ABCD

Je efektivní způsob, jak popsat transformaci gaussova svazku optickými soustavami. [2]

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (2.2.4.1)$$

Tento vztah bývá označován jako zákon ABCD nebo také jako Kogelníkův zákon.

Jelikož se na spojitě proměnné nehomogenní prostředí můžeme dívat jako na řadu nekonečně tenkých k sobě přiléhajících skokově se měnících prostředí, tak lze za předpokladu, že všechny uvažované paprsky zůstávají parciální, aplikovat zákon ABCD i na tyto nehomogenní soustavy.

Šíření volným prostorem

Je-li optická soustava volný prostor, má přenosová matice M prvky $A = 1$, $B = d$, $C = 0$ a $D = 1$.

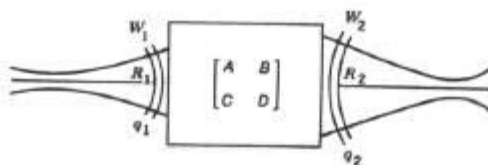
Průchod tenkým optickým prvkem

V tomto případě, při průchodu tenkým optickým prvkem vypadají prvky přenosové matice M následovně: $A = 1$, $B = 0$, C a D mohou být libovolné. U všech tenkých optických prvků však platí $D = n_1/n_2$.

Invariace zákona ABCD při kaskádním řazení optických prvků

Platí-li zákon ABCD pro každé dvě optické soustavy s maticemi $M_i = (A_i, B_i, C_i, D_i)$ $i = 1, 2$, platí také pro zobrazovací soustavu vytvořenou jejich kaskádním uspořádáním (s maticemi $M = M_2 M_1$).

Pro větší přehlednost je uveden obrázek Obr. 2.2, kde jsou vyznačeny jeho základní charakteristiky a parametry.



Obr. 2.2 Transformace gaussova svazku libovolnou soustavou, která je popsaná maticí ABCD [2]

2.3 Hermiteovské – Gaussové svazky

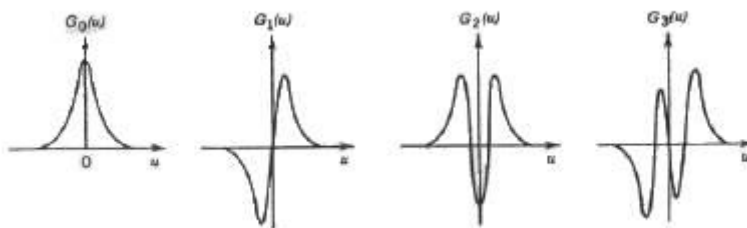
Tyto svazky tvoří úplný systém řešení parciální Helmholtzovy rovnice. Řešením parciální Helmholtzovy rovnice nemusejí být pokaždé gaussové svazky. Existují i jiná řešení, s tzv. negaussovským rozložením intenzity záření. Jiné rozložení intenzity mají zejména gaussové svazky s paraboloidními vlnoplochami. Tyto jsou zajímavé v tom, že se mohou beze změny svého tvaru postupně odrážet od dvou sférických zrcadel tvořících rezonátor. Tyto samoobnovující se vlny se nazývají módy (vidy) rezonátoru. Pro komplexní amplitudu hermiteovského – gaussovského svazku platí: [2]

$$U_{1,m}(x, y, z) = A_{1,m} \left[\frac{W_0}{W(z)} \right] G_1 \left[\frac{\sqrt{2}x}{W(z)} \right] G_m \left[\frac{\sqrt{2}y}{W(z)} \right] \times \exp \left[jkz - jk \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + j(1+m+1)\zeta(z) \right] \quad (2.3.1)$$

kde

$$G_l(u) = H_l(u) \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad l = 0, 1, 2, \quad (2.3.2)$$

je Hermiteova – Gaussova funkce řádu l a $A_{1,m}$ je konstanta.



Obr. 2.3 Hermiteovy – gaussovy funkce [2]

2.4 Laguerreovské - Gaussové a Besselovské svazky

Laguerreovské - Gaussové svazky

Laguerreovský - gaussovský svazek nejnižšího řádu je opět gaussovský svazek. Zavedeme-li místo kartézských souřadnic (x,y,z) válcové souřadnice (ρ, φ, z) a přepíšeme do nich paraxiální Helmholtzovu rovnici, pak jejím řešením získáme tzv. laguerreovské – gaussové svazky.

Besselovské svazky

Vlna, u níž dochází k šíření optického výkonu pouze jedním směrem a to ve směru osy z , se nazývá besselovský svazek. Komplexní amplituda besselovského svazku je přesným řešením Helmholtzovy rovnice. Oproti tomu komplexní amplituda gaussovského svazku je přibližným (nicméně přesným) řešením paraxiální Helmholtzovy rovnice. Intenzita besselovského svazku je úměrná $J_0^2(k_{Tp}) \approx (2/\pi k_{Tp}) \cos^2(k_{Tp} - \pi/4)$. Tato závislost má oscilující charakter s klesající amplitudou. Střední kvadratická odchylka besselovského svazku má pro všechna z nekonečně velkou hodnotu. Generování besselovských svazků vyžaduje speciální postupy. Gaussové svazky tvoří mody sférických rezonátorů a jsou tak přirozeně generovány lasery.



Obr. 2.4 Příčný profil intenzity besselovského a gaussova svazku [2]

3 SIMULACE GAUSSOVA SVAZKU POMOCÍ MATLABU

V této kapitole bude popsána simulace gaussova svazku. Nejdříve bude rozebrána celá problematika matematicky a poté i prakticky, kdy bude představen vytvořený program a výsledky simulací šířícího se gaussova svazku.

Po zadání vstupních hodnot, kterými jsou počet vzorků, zobrazovaná oblast, vlnová délka a pološířka svazku se vypočítá Rayleighova vzdálenost podle vztahu

$$q_0 = \frac{kw_0^2}{2}, \quad (3.1)$$

kde k je vlnové číslo, w_0 označuje pološířku svazku.

Následně se vypočítá velikost kroku, podle kterého se bude zobrazovat poté výsledná intenzita

$$\Delta = \frac{L}{N}, \quad (3.2)$$

kde L představuje zobrazovanou oblast a N počet vzorků.

Místo na ose x , y pro m -tý a n -tý vzorek se vypočítá jako

$$x(m) = m - 1 \times \Delta - L / 2, \quad (3.3)$$

$$y(m) = m - 1 \times \Delta - L / 2. \quad (3.4)$$

Gaussův svazek v prostoru je dán vztahem

$$G(n, m) = e^{\frac{-x(m)^2 + y(m)^2}{w_0^2}}. \quad (3.5)$$

Hodnoty frekvenční osy se určí

$$Kx(m) = \frac{2\pi(m-1)}{N\Delta} - \frac{2\pi N}{N \frac{\Delta}{2}}, \quad (3.6)$$

$$Ky(n) = \frac{2\pi(n-1)}{N\Delta} - \frac{2\pi N}{N \frac{\Delta}{2}}. \quad (3.7)$$

Přenosová funkce záření se vypočítá

$$Z(n, m) = e^{\frac{j}{2kL Kx(m)^2 + Ky(n)^2}}. \quad (3.8)$$

Gaussov svazek ve frekvenční oblasti se určí jako dvoudimenzionální Fourierova transformace vztahu

$$G_f = \int_{-\infty}^{\infty} G(t) e^{-2\pi i t} dt, \quad (3.9)$$

G představuje funkci Gaussova svazku v prostoru.

Šíření Gaussova svazku ve frekvenční oblasti

$$G_s = G_f Z, \quad (3.10)$$

G_f je Gaussova funkce ve frekvenční oblasti a Z je pak funkce záření.

Maximální amplituda počátečního svazku se určí tak, že se vybere maximální hodnota z funkce $G(n,m)$.

Šíření Gaussova svazku v otevřeném prostoru se vypočítá jako zpětná dvoudimenzionální Fourierova transformace

$$G_p = F^{-1} G_s, \quad (3.11)$$

G_s představuje funkci šířícího se Gaussova svazku.

Maximální amplituda šířícího se svazku se určí znovu tak, že vybereme maximální hodnotu z funkce G_p .

Teoretická šířka svazku je dána vztahem

$$w_t = \frac{2q_0}{k(1 + \frac{L}{q_0})^2}, \quad (3.12)$$

$$w_{vysledna} = w_t^2, \quad (3.13)$$

w_t je teoretická šířka svazku.

Pokud má optický svazek v dané rovině $z=\text{konst.}$ gaussovské rozložení, relativní rozložení optické intenzity v jedné ose svazku $I_r(x)$ normované vůči intenzitě na ose svazku $I_0(z)$ je popsáno matematickým vztahem [9]

$$I(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (3.14)$$

kde

μ_x je posunutí středu svazku od osy šíření a σ_x^2 je variance optické intenzity.

Výsledné rozložení gaussovského svazku odpovídá vztahu [9]

$$I(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\Pi} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}. \quad (3.15)$$

V případě laserového svazku můžeme přejít od odchylky σ k tzv. pološířce svazku w

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{w_x}{2}\right)^2. \quad (3.16)$$

Umístěním středu svazku na osu šíření dospějeme k normovanému rozložení optické intenzity elipticky symetrického svazku [9]

$$I(x, y, z) = \frac{2}{\Pi w_x(z) w_y(z)} e^{-2\left(\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)}\right)}, \quad (3.17)$$

kde z je parametr.

Pro obecné rozložení energie ve svazku platí: [9]

$$I(x, y, z) = \frac{2}{\Pi w_x(z) w_y(z)} e^{-2\left(\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)}\right)}. \quad (3.18)$$

Integrací optické intenzity přes plochu svazku můžeme určit celkový výkon přenášený svazkem [9]

$$P = I_0(z) \iint_S \frac{2w_{x0}(z)w_{y0}(z)}{\Pi w_x(z)w_y(z)} e^{-2\left(\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)}\right)} dS. \quad (3.19)$$

Pro rozložení optické intenzity a celkový výkon přenášený kruhovým svazkem platí: [9]

$$I_{kruh}(x, y, z) = I_0(z) \frac{2w_0^2(z)}{\Pi w^2(z)} e^{-2\left(\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}\right)}, \quad (3.20)$$

$$P_{kruh} = I_0(z) \iint_S \frac{2w_0^2(z)}{\Pi w^2(z)} e^{-2\left(\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}\right)} dS. \quad (3.21)$$

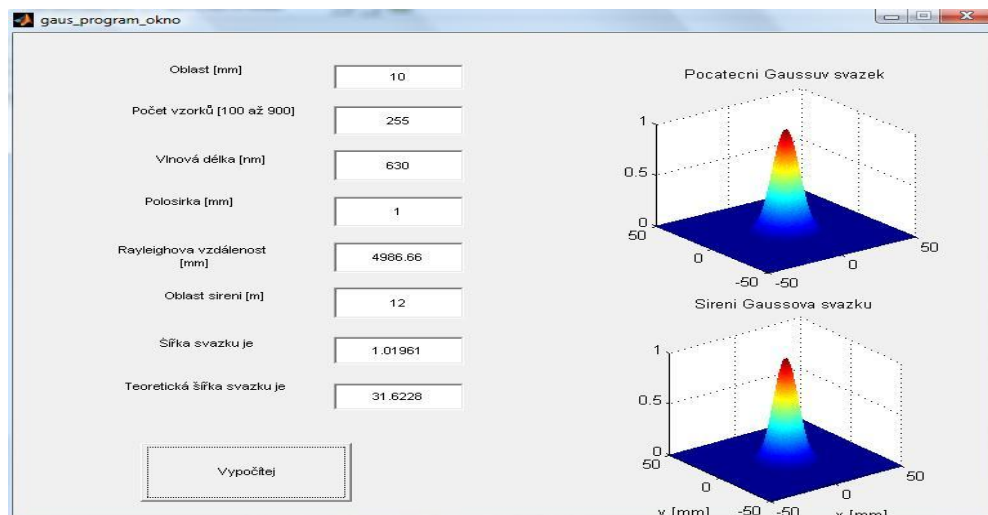
Tab. 3.1: Svazek má parametry:

w_0	pološírka(poloměr) pásu svazku
q_0	Rayleighova vzdálenost
w	pološírka(poloměr) svazku ve vzdálenosti z od pásu
R	poloměr křivosti vlnoplochy
k	vlnové číslo
ω	kruhová frekvence

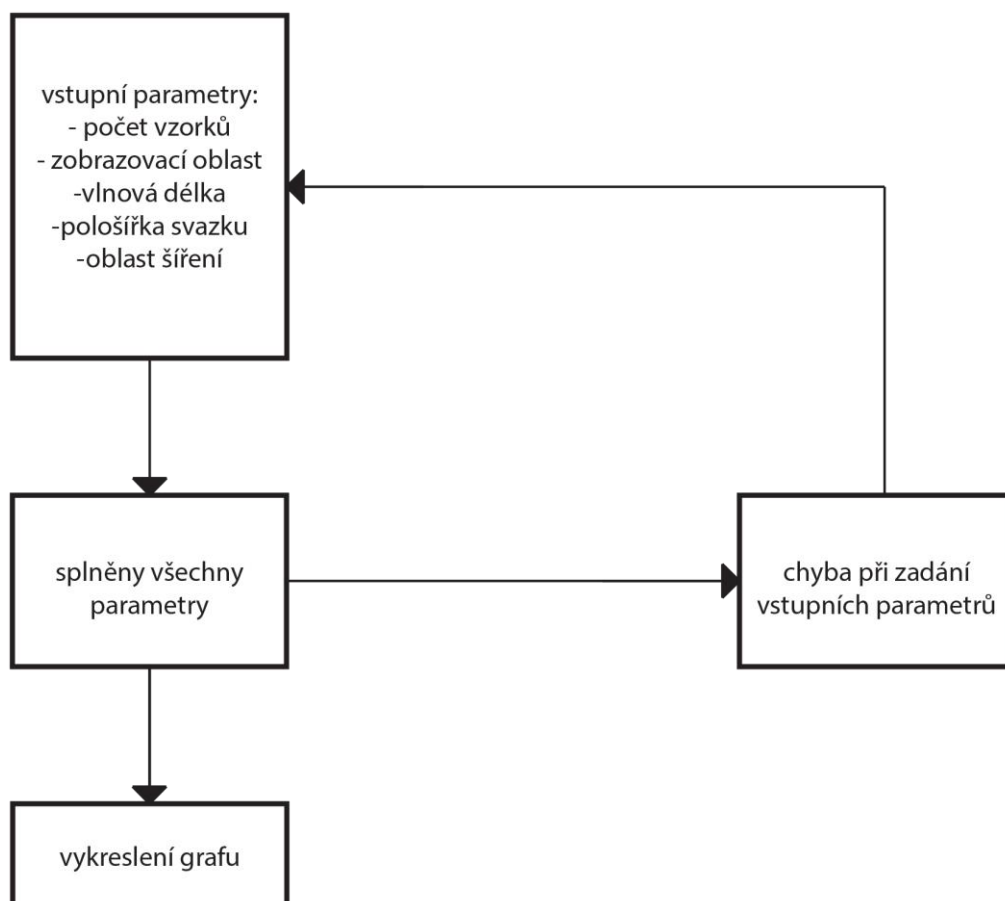
Tyto matematické vzorce byly implementovány do vytvořeného programu. Simulace gaussova svazku byly provedeny v programu MATLAB®. V programu MATLAB® byl simulován kruhově symetrický svazek v ideálním bezeztrátovém, stacionárním, homogenním a izotropním prostředí. V další části je tato teoretická část ověřena i prakticky. Je tak možné porovnat teoretické výsledky (výsledky ze simulací) s naměřenými výsledky na fotodetektoru.

Vstupními parametry programu jsou počet vzorků, zobrazovaná oblast, vlnová délka, pološírka svazku a oblast šíření svazku. Pro zadání hodnoty oblasti šíření gaussova svazku je potřeba zadat hodnotu větší než je Rayleighova vzdálenost. Ze samotné teorie totiž plyne, že přesně v Rayleighově vzdálenosti má optický svazek poloměr rovný druhé odmocnině, násobený pološírkou svazku v krčku (w_0). Je tedy dobré zadávat vzdálenost větší než je Rayleighova vzdálenost, protože se pak svazek začne rozšiřovat. Poté, co uživatel zadá všechny potřebné parametry a klikne na tlačítko “*Vypočítej*“, dojde k vykreslení grafů zobrazujících gaussův svazek. Na začátku oblasti, kterou se svazek šíří a na konci oblasti šíření. Můžeme pozorovat, že na konci oblasti šíření je svazek širší, přesně jak plyne z teorie. Grafické rozhraní vytvořeného programu je na Obr. 3.1. Vývojový diagram uvedeného programu je na Obr. 3.2.

V tabulce 3.2 je příklad zadaných hodnot a na obrázcích 3.3 a 3.4 poté výsledky simulací.



Obr. 3.1 Okno vytvořeného programu

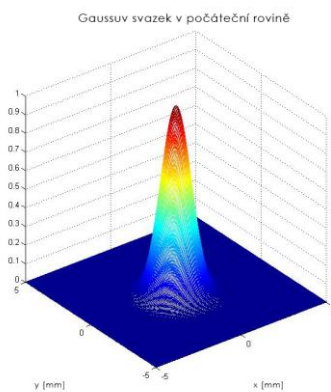


Obr. 3.2 Vývojový diagram vytvořeného programu

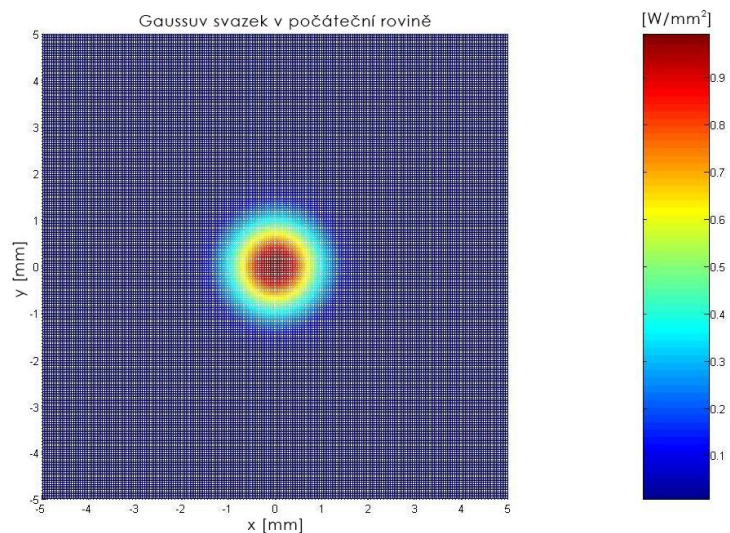
Tab. 3.2: Ukázka zadaných hodnot

Při zadání hodnot	
Počet vzorku	255
Oblast zobrazení	10 [mm]
Vlnová délka světla	630 [nm]
Pološířka Gaussova svazku v krčku	1 [mm]
Rayleighova vzdálenost je	4.986655 [m]
Vzdálenost šíření	12
Maximální amplituda je	0.999231 [m]
Amplituda šířícího se svazku je	0.381179
Šířka svazku je	2.235294 [mm]

Na Obr. 3.3 je zobrazen gaussův svazek na počátku oblasti šíření.

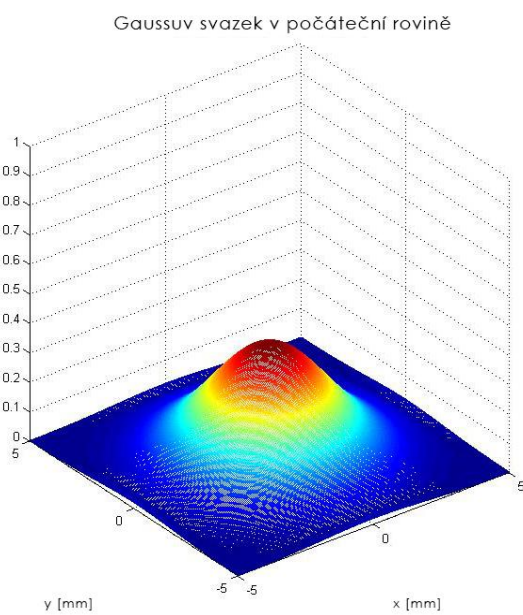


Obr. 3.3a Gaussův svazek v počátku oblasti šíření

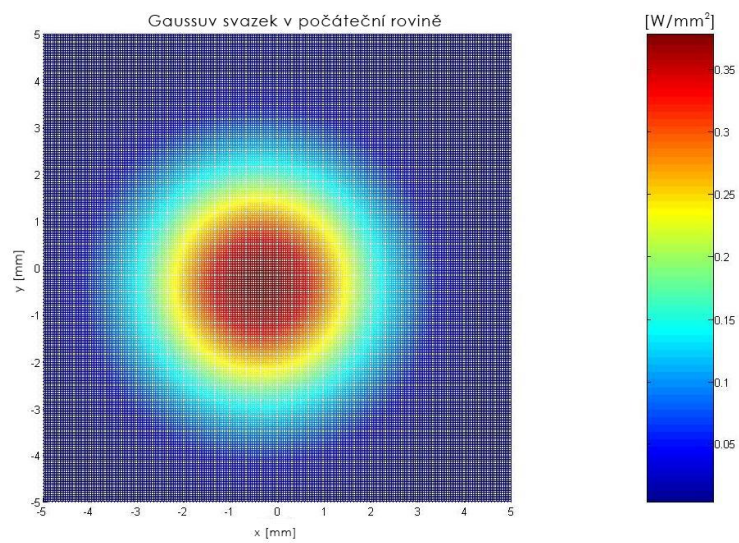


Obr. 3.3b Gaussův svazek v počátku oblasti šíření (pohled shora)

Na Obr. 3.4 je zobrazen gaussův svazek na konci oblasti šíření, na zvoleném příkladu je dobře patrné rozšiřování svazku při překročení Rayleighovy vzdálenosti.



Obr. 3.4a Gaussův svazek na konci oblasti šíření



Obr. 3.4b Gaussův svazek na konci oblasti šíření (pohled shora)

4 KOMERČNĚ DOSTUPNÉ SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH SVAZKŮ

Informace o jednotlivých komerčních systémech byly čerpány z [15].

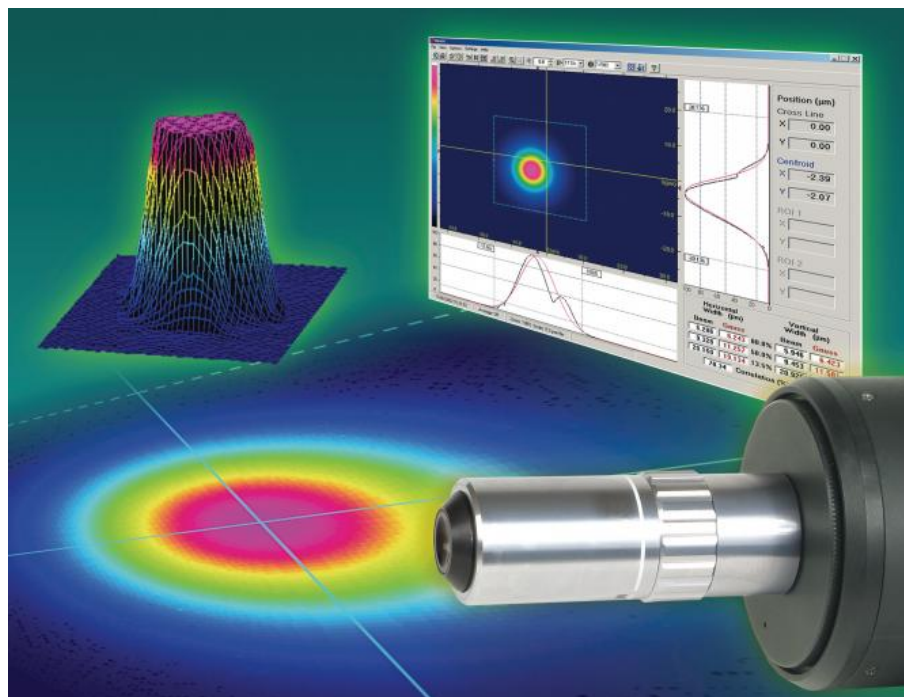
V současnosti je na světovém trhu celá řada různých systémů pro určování vlastností optických svazků. Tyto systémy nesou označení LBP (anglicky Laser beam profile). Na trhu se vyskytuje široký sortiment LBP systémů, které jsou přizpůsobené jednotlivým typům laserů - pulzní, infračervené, ultrafialové, nízkovýkonové, vysokovýkonové). LBP systémy umožňují měřit divergenci svazku, pološířku svazku a také profil svazku, tj. 2D intenzitní rozdělení svazku v daném místě ve směru šíření. LBP systémy využívají různé techniky pro měření uvedených veličin:

Metoda posuvné hrany – posuvná hrana (případně také šterbina) se zasouvá napříč svazkem před detektorem výkonu

CMOS kamera nebo CCD snímáče – spočívá v přímém osvětlení senzoru kamery

Fotografické desky – toto je jedna z nejvíce využívaných metod, které se používaly v historii.

V posledních letech se cena komerčních LBP hodně snížila, zejména u CCD kamer je to způsobeno zejména nízkou cenou křemíkových CCD senzorů. Ještě před 10 lety se jejich cena pohybovala 5000 – 9000 USD. Dnes jsou běžně dostupné v rozmezí 100 – 300 USD. U LBP využívajících metodu posuvné hrany se cena před 10 lety pohybovala okolo 600 – 13 000 USD.



Obr. 4.1 μ Beam profiler (ilustrační foto) [18]

4.1 μ Beam profiler

μ Beam profiler patří mezi všestranné měřicí systémy. Umožňuje analytické i grafické měření vlastností svazků menších než $1\mu\text{m}$. μ BP umožňuje měření v reálném čase s vlnovody, laserovými diodami, kontinuálními i pulzními lasery, které mají rozměry svazků pod $1\mu\text{m}$.

Program μ Beam profiler umožňuje zobrazení optického svazku v reálném čase. Digitální zoom umožňuje přiblížení až 32 krát. Program umí také zobrazit a vyhodnotit příčné profily svazku jak v horizontální, tak i ve vertikální rovině. Pro každý profil svazku je vytvořen ideální gaussovský profil a poté zobrazí proložení s reálným optickým svazkem. Můžeme tedy hned porovnávat případné odchylky nebo rozdíly.

Technické údaje: [15]

Specifikace kamery	CCD, formát 1/6'', 800000 px
Spektrální odezva	350 – 1100 nm
Minimální měřitelná velikost svazku	0,5 μm pro objektiv 100 krát
Útlum	Vyměnitelný filtr NG10
Zvětšení	4 – 100 krát

4.2 LaserCam – HR – fa Coherent

Jedná se o digitální kameru s CMOS senzorem a umožňuje tak analýzu laserových svazků od 270 μm do 5,5 mm.

Ke kameře LC – LH je dodáván software BeamView, který je taktéž od firmy Coherent. Tento program dokáže zaznamenat optický svazek v reálném čase ve 2D i 3D profilu.

Technické údaje: [15]

Specifikace kamery	CMOS, formát 2/3'', 1230 $\times$ 1024 px, 8,5 $\times$ 6,5 mm
Spektrální odezva	300 – 1100 nm
Minimální měřitelná velikost svazku	0,2 mm
Útlum	koresponduje s ostatními výrobky firmy Coherent
Zvětšení	koresponduje s ostatními výrobky firmy Coherent

4.3 LBA – FW – SCOR – fa Spiricon

Technické údaje: [15]

Specifikace kamery	CCD, 1600×1200 px, $7 \times 5,3$ mm
Spektrální odezva	350 – 1320 nm

4.4 NIST – Traceable – fa Photon

Technické údaje: [15]

Specifikace kamery	CMOS, formát 1/2''
Spektrální odezva	190 – 1100 nm

4.5 FireWire(IEEE 1394) – fa Photon

Technické údaje: [15]

Specifikace kamery	CCD, formát 2/3''
Spektrální odezva	190 – 1100 nm

4.6 Laser Bema Profilers – fa Newport

Technické údaje: [15]

Specifikace kamery	CCD, $6,47 \times 4,83$ mm
Spektrální odezva	190 – 1100 nm, 1310 nm, 1550 nm (pro různé kamery)

5 METODA MĚŘENÍ INTENZITNÍHO PROFILU SVAZKU PRO VYUŽITÍ V OPTICKÝCH BEZKABELOVÝCH KOMUNIKACÍCH

V předcházejících kapitolách byla popsána teorie zdrojů záření a teoreticky byla popsána také teorie optických svazků. V této kapitole bude popsána metoda pro měření intenzitního profilu optických svazků. Blokově je tato metoda ukázána na Obr. 5.2.

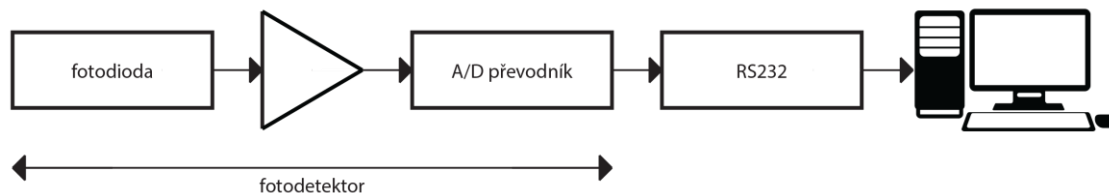
Intenzitu světelného záření bude zaznamenávat fotodetektor umístěný na posuvném rameni a data budou posílána ke zpracování do PC. Zesilovačem je světelné záření zesíleno a přivedeno ke zpracování do procesoru Atmega16, který obsahuje interní A/D převodník. Zde je signál převeden z analogové do digitální podoby a připraven tak k dalšímu zpracování. Nejdříve musí proběhnout vzorkování, kdy je analogový signál reprezentován sérií vzorků, (musí být dodrženo Nyquistovo kritérium), a poté proběhne kvantování. Pomocí rozhraní RS232 je takto upravený signál přiveden do počítače, kde pomocí programu je zobrazen změřený gaussův svazek.

Posuvné rameno má technický název M – IMS 400. Délka dráhy, po které se rameno posouvá, je 800 mm. Toto zařízení se ovládá pomocí přístroje ESP 301. Pro tento náš případ se jedná o plně automatizované pracoviště, takže posuv ramene bude ovládán z PC, posíláním příkazů přes rozhraní RS232. Přístroj M – IMS 400 je zobrazen na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 M – IMS 400 [3]

Blokové schéma metody měření intenzitního profilu svazku



Obr. 5.2 Blokové schéma metody

5.1 Fotodioda

Pro tuto úlohu byla vybrána fotodioda – BPW34 která je použitelná pro světlenou oblast 530 nm až 1500 nm.

Tab. 5.1: Technické parametry fotodiody [14]

Úhel vyzařování	$\pm 60^\circ$
Typ	BPW 34
Vlnová délka	530 nm – 1500 nm
Typ pouzdra	TO 92
E (V)	1000 lx
Splňuje RoHS	Ano

Před použitím fotodiody BPW34 byly ověřeny její vlastnosti. Zkoumala se citlivost fotodiody při různých podmínkách prostředí. Výsledky při různých podmínkách laboratorního prostředí jsou shrnuty v tabulce 5.2.

Tab. 5.2: Praktické ověření vlastností fotodiody BPW34 při různých podmínkách prostředí

Na fotodiodě bylo při různých vlastnostech prostředí změřen proud a optický výkon laseru. Následně se určila citlivost fotodiody.

Tab. 5.2 A: Vlastnosti fotodiody

Prostředí			Citlivost
Tma	Laser	NE	0 mA/mW
Tma	Laser	ANO	1,9 mA/mW

Tab. 5.2 B: Vlastnosti fotodiody

Prostředí			Citlivost
Denní světlo +světlo laboratoře	Laser	NE	0,069 mA/mW
Denní světlo +světlo laboratoře	Laser	ANO	1,9 mA/mW

Tab. 5.2 C: Vlastnosti fotodiody

Prostředí			Citlivost
Zatažené rolety +světlo laboratoře	Laser	NE	0,04 mA/mW
Zatažené rolety +světlo laboratoře	Laser	ANO	1,88 mA/mW

Světelné záření detekované fotodiodou BPW34 je potřeba zesílit, aby následně mohlo být přivedeno do interního A/D převodníku procesoru Atmega16. Pro účely této práce byl zvolen zesilovač LM 324. Jeho nejdůležitější parametry jsou uvedeny v tabulce 5.3.

5.2 LM 324

Tab. 5.3: Parametry LM 324 [16]

Napájecí napětí	$\pm 16 \text{ V}$
Ztráta energie	500 mW
Diferenciální vstupní napětí	$\pm 30 \text{ V}$
T_{MIN}, T_{MAX}	0 °C, 70 °C
Vstupní napětí	$\pm 15 \text{ V}$

Takto zesílený signál je potřeba zpracovat v PC, ale předtím se musí převést z analogové do digitální podoby. K tomu je využit mikrokontrolér – Atmega16, který obsahuje A/D převodník. Mikrokontrolér je napájen 5V, podle datasheetu [10] byl zapojen do vytvořeného obvodu pro zpracování optického signálu. Analogový signál je přiveden do mikrokontroléru, díky internímu A/D převodníku je signál digitalizován a vyveden přes RS232 rozhraní do PC. Uvedený postup zpracování signálu je znázorněn blokovým schématem na Obr. 5.2. Takto zpracovaný signál je poté přes RS 232 rozhraní přiveden do PC, kde bude ve výsledku zobrazen profil svazku.

6 NÁVRH FOTODETEKTORU

Fotodetektor je realizován na jedné desce plošného spoje. Skládá se z několika částí: napájecí část, procesor Atmega16 a komunikační část, kterou tvoří obvod MAX232 a propojuje procesor s konektorem RS232.

Procesor Atmega16 je zapojen podle účelů aplikace fotodetektoru. Piny 15 PDO(TX) a 14 PD1(RX) jsou propojeny s obvodem MAX232 z důvodu komunikace. A/D převodník je pak připojen na pin 40 PA0(ADC0).

Programování procesoru Atmega16 je prováděno externě a po naprogramování je procesor vložen do připájené patice na desce plošného spoje fotodetektoru.

6.1 A/D převod

Pro zpracování hodnot je potřeba mít data v digitální podobě. Tomu tak ale často není, veličiny mají často analogový charakter. Proto se v praxi využívají A/D převodníky, které převedou veličiny do digitální podoby. Vstupní, analogovou část, bývá nejčastěji napětí a výstupní, digitální částí jsou poté převedená data.

A/D převod má dva kroky. Jedná se o vzorkování kvantování. Vzorkováním se rozumí rozdělení signálu na určitý počet vzorků (hodnot). U vzorkování je důležité dávat pozor na aliasing. To znamená, že vzorkovací frekvence musí být minimálně dvakrát větší než frekvence harmonické složky signálu, jinak dojde právě ke zmiňovanému aliasingu. Toto pravidlo je označováno jako Shannonův zákon. Další částí A/D převodu je potom kvantování, kdy je každému vzorku přiřazena velikost.

V případě této práce je použit interní A/D převodník mikrokontroléru Atmega16.

6.2 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA

Pro účely této práce byl vybrán procesor od firmy ATMEL z řady MEGA, konkrétně se jedná o typ Atmega16. S tímto procesorem jsem už pracoval na podobných projektech, proto jsem jej použil i pro tyto účely. Pro programování byla zvolena vývojová deska STK 500 Starter kit.

A/D převodník (Analog to Digital Converter):

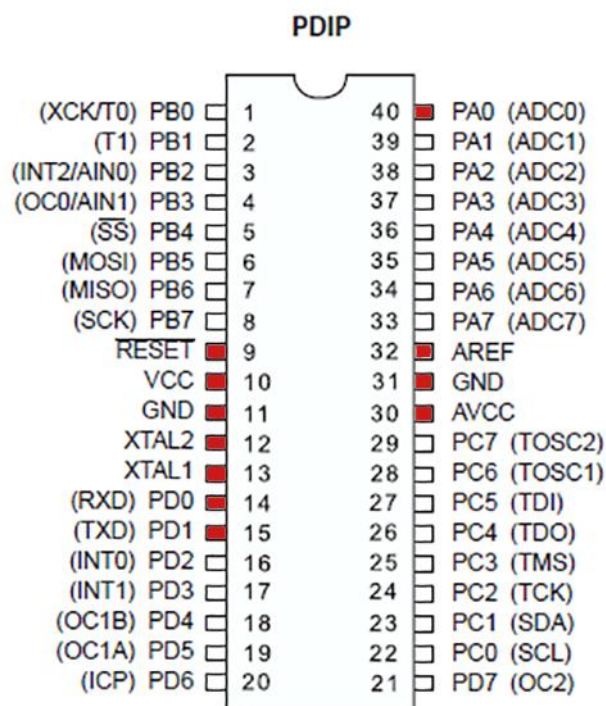
Procesor Atmega16 je vybaven 8 kanálovým, 10 bitovým A/D převodníkem. A/D převodník pracuje na principu postupné aproximace. Na vstup je připojený multiplexer, který na vstup přepíná piny ADC0 – ADC7, referenci 2,56V nebo pin analogové země AGND. Vzorkování obstarává obvod S/H a zesilovač, výsledkem je potom desetibitové slovo. [12]

Vlastnosti:

- průměrný čas konverze je kolem 15000 vzorků za sekundu (65 – 260us)

- možnost zvolit mezi kontinuálním během a ručním spouštěním
- pro napěťovou referenci je na výběr mezi vnitřní referencí na úrovni napájecího napětí, externím referenčním obvodem a vnitřní referencí 2,56 V
- celkem je zde 8 různých vstupů, 7 rozdílových vstupů (2 s možností nastavení zisku).
- nelinearita $\pm 0,5$ LSB
- přesnost ± 2 LSB
- možnost zpuštění přerušování po dokončení konverze
- nastavitelné rozlišení
- až 10 bitové rozlišení

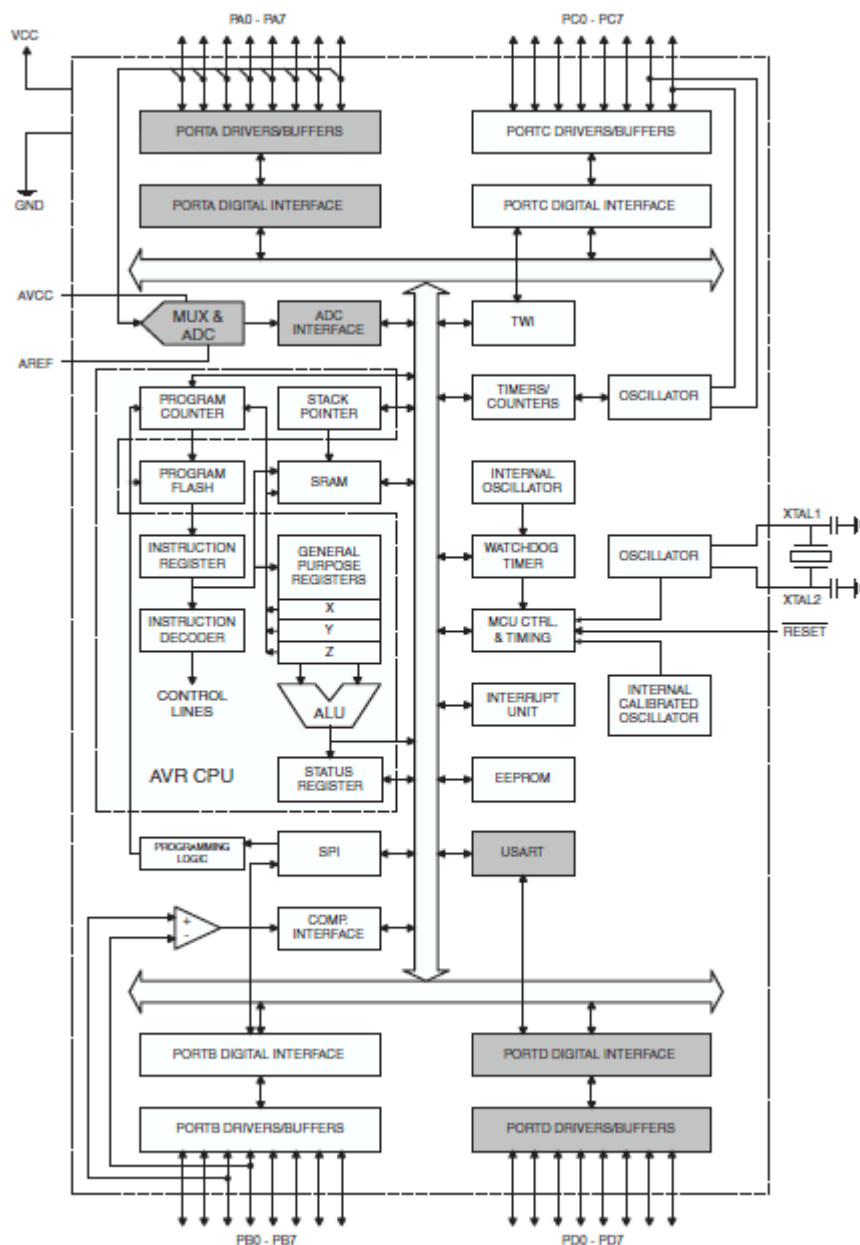
Na Obr. 6.1 jsou vidět piny, které jsou použité pro funkci fotodetektoru.



Obr. 6.1 Rozložení pinů u Atmega16 [10]

Piny PD0 a PD1 slouží k propojení procesoru s výstupním rozhraním RS232 v našem případě. Na pinech XTAL1 a XTAL2 je připojen externí krystal 8MHz. Další piny jsou pro zem a napájení. Na pin RESET je připojeno resetovací tlačítko pro změnu stavu procesoru. Na pin ADC0 jsou přiváděna data k A/D konverzi. Zapojení pinů 30 – 32 je možné vidět na schématu v příloze práce.

Na Obr. 6.2 je ukázáno, z jakých částí se skládá procesor Atmega1



Obr. 6.2 Blokové schéma Atmega16 [10]

Šedě jsou opět vyznačeny části procesoru, které jsou využívány při zpracování naměřených dat fotodiodou. Zejména se jedná o vzorkování intenzity laserového záření a komunikaci s PC. O vzorkování se stará interní ADC převodník. Komunikaci mezi procesorem a PC pak jednotka USART.

6.3 Realizace fotodetektoru:

Fotodetektor je realizován na jedné desce plošného spoje. Skládá se z několika částí: napájecí část, procesor Atmega16 a komunikační část, kterou tvoří obvod MAX232 a propojuje procesor s konektorem RS232.

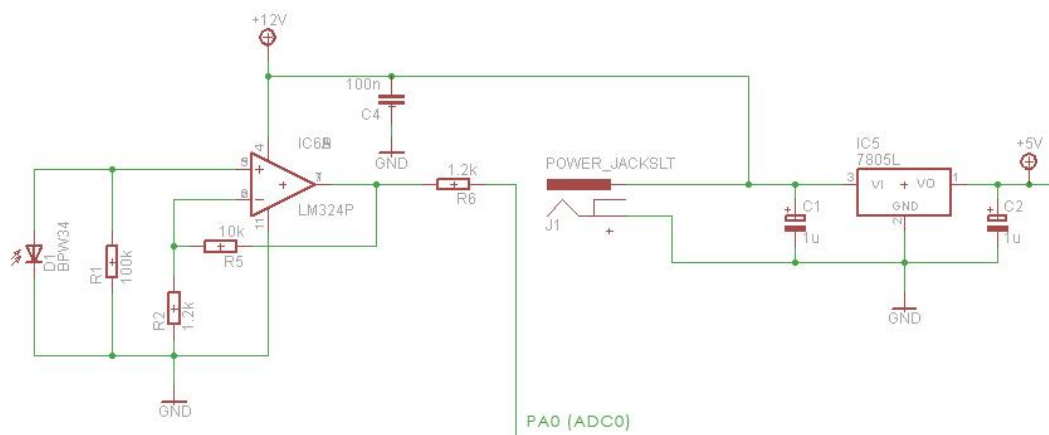
Procesor Atmega16 je zapojen podle účelů aplikace fotodetektoru. Piny 15 PDO(TX) a 14 PD1(RX) jsou propojeny s obvodem MAX232 z důvodu komunikace. A/D převodník je pak připojen na pin 40 PA0(ADC0).

Programování procesoru Atmega16 je prováděno externě a po naprogramování je procesor vložen do připájené patice na desce plošného spoje fotodetektoru.

Napájení

Vstupní napájecí obvod se zesilovačem LM324 je napájen 12V, kvůli zesílení signálu detekovaného fotodiodou, který je následně přiveden na procesor Atmega16. Procesor Atmega16 potřebuje napájení 5V, použijeme tak stabilizátor napětí LM7805.

Na Obr. 6.3 je znázorněn napájecí obvod fotodetektoru se stabilizátorem LM7805.



Obr. 6.3 Schéma vstupního napájecího obvodu

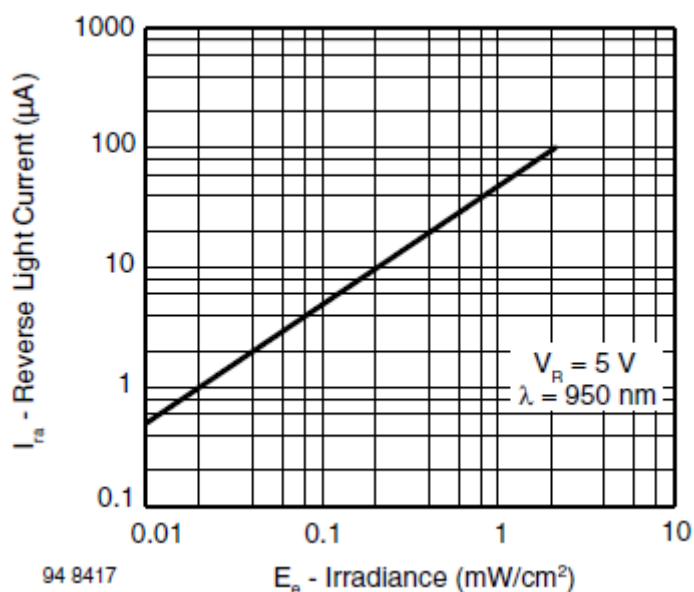
Fotodioda

Pro snímání intenzity světla byla vybrána fotodioda BPW34. Tato fotodioda je v miniaturním plochém plastovém pouzdře, zároveň se jedná o velmi rychlou a citlivou fotodiodu. BPW34 má široký přijímací úhel a díky své velké aktivní oblasti je také velmi rychlá.



Obr. 6.4 Fotodioda BPW34 (ilustrační foto) [14]

BPW34 pracuje v proudovém režimu, závislost proudu a intenzitě dopadajícího světelného záření je lineární.

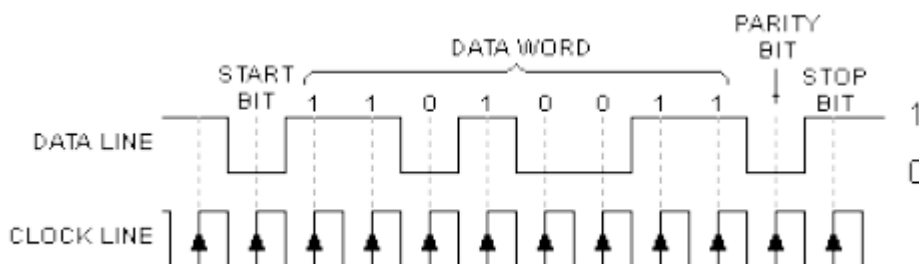


Obr. 6.5 Závislost závěrného proudu na osvitu fotodiody [14]

Celkové schéma zapojení fotodiody ve funkci snímače intenzity laserového záření je uvedeno v příloze práce.

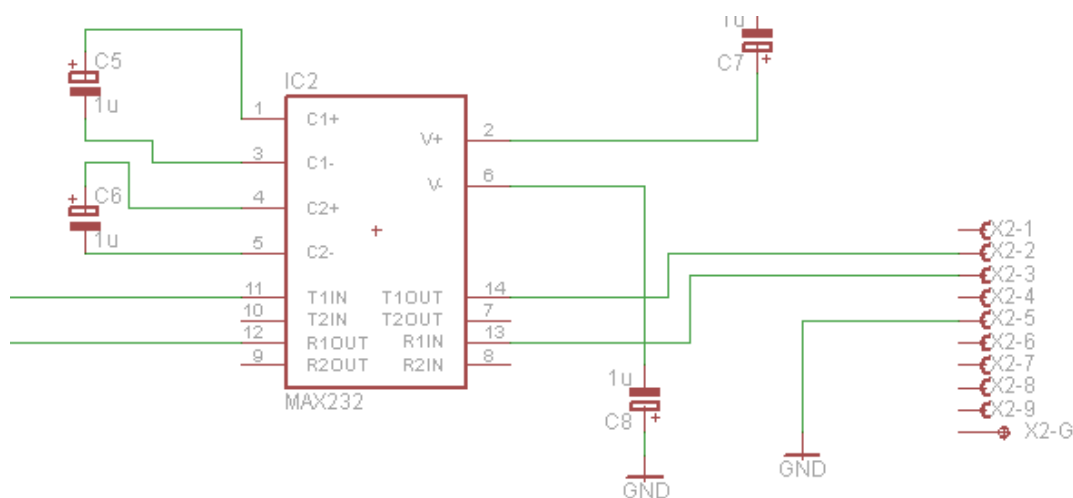
Komunikace přes RS-232

Komunikace probíhá přes rozhraní RS-232, pomocí obvodu MAX232 a periferie USART. Rychlost je nastavena na 19200 Bd. Nejčastější typ přenosu dat je asynchronní přenos. Při asynchronním přenosu má vysílač a přijímač stejné nastavení komunikace. To je stejná přenosová rychlost (Baudová rychlost), počet přenášených bitů, počet stop bitů a parita. Při komunikaci je nejdříve vyslán 1 start bit, pak 8 bitů (od nejméně významného po nejvýznamnější), poté následuje bit označující paritu a nakonec stop bit.



Obr. 6.6 Asynchronní přenos dat [13]

Zapojení konektoru RS232 je vidět na Obr.6.7.



Obr. 6.7 Propojení fotodetektoru s konektorem RS232 přes obvod MAX 232

Konektor RS232 je připojen k celému obvodu přes obvod MAX232. Je využíván pouze jeden pin pro příjem a pro vysílání T1 a R1. Nutnou součástí obvodu MAX232 jsou také blokovací kondenzátory.

Řídící obvod

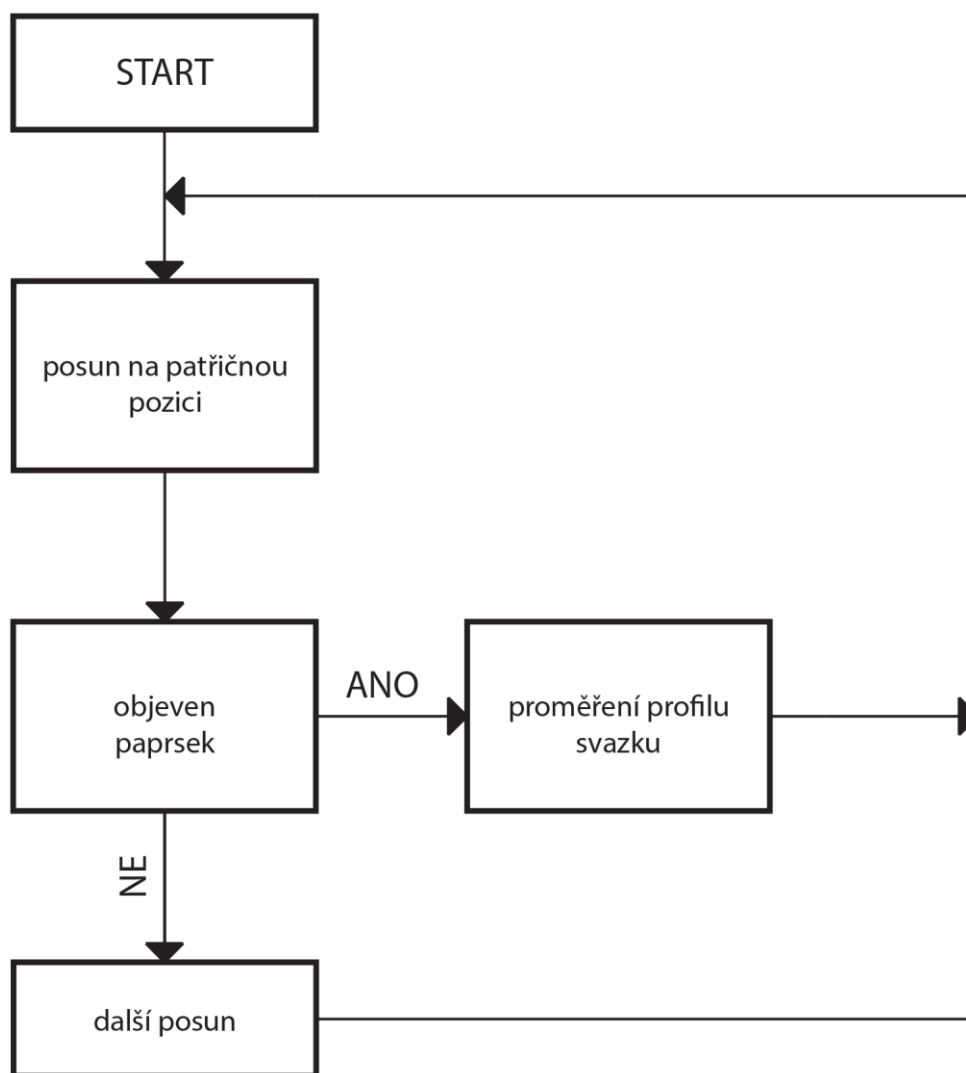
Řídícím obvodem je myšlena celá deska plošného spoje. Jedná se o vstupní napájecí obvod se zesilovačem LM324 a fotodiodou. Dále je zde samotný procesor a komunikační obvod MAX232, který propojuje procesor s konektorem RS232.

Ovládání posuvu M – IMS 400

Pohyb fotodetektoru je zajištěn ovládáním stojanu M – IMS 400. Ten je propojen se zařízením ESP 301, ze kterého se vysílají jednotlivé příkazy k posunu stojanu. Na úvod byla vyzkoušena komunikace posíláním příkazů přes Hyperterminal: 1PAXX (posun doleva o určitou hodnotu) nebo -1PAXX (posun doprava o určitou hodnotu). Následně byla vytvořena v Microsoft Visual Studiu 2010 uživatelská aplikace, ze které uživatel může přímo ovládat pohyb posuvného stojanu. Pomocí tlačítka “Posun” uživatel udává přesně o jakou hodnotu se má zařízení posunout. Tlačítkem “Start” uživatel dá pokyn, aby se stojan posunul na druhou stranu.

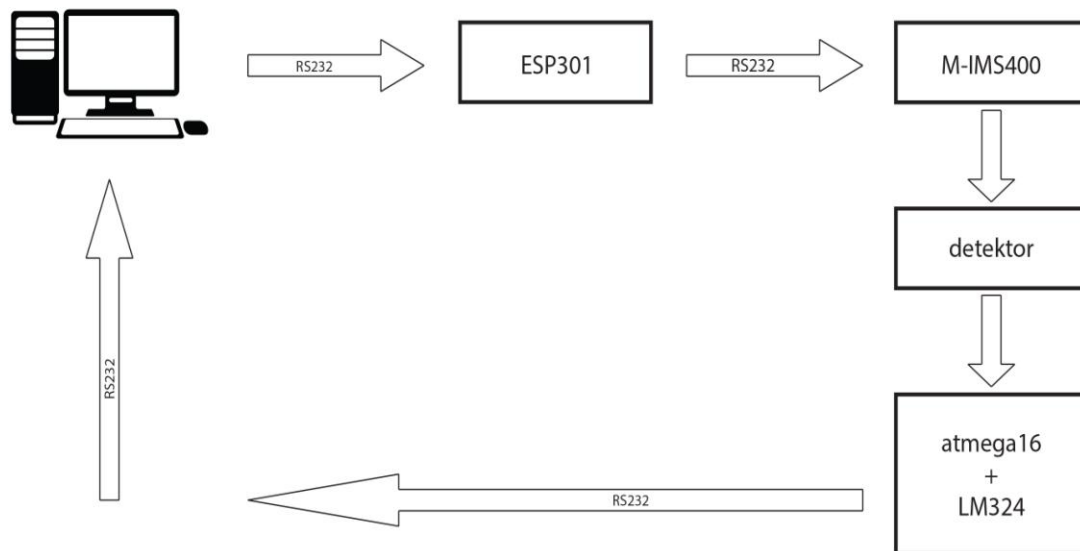
7 PROGRAM PRO OVLÁDÁNÍ POSUVU M – IMS 400 A ŘÍZENÍ PROCESORU ATMEGA16

Fotodetektor pracuje podle vývojového diagramu na Obr. 7.1. Posuv M – IMS 400 s fotodetektorem je posunut do místa záření laseru. Následně je detekováno toto záření fotodetektorem, který díky svému internímu A/D převodníku pošle data do PC, kde jsou zpracována.



Obr. 7.1 Vývojový diagram: Snímání intenzity světelného záření

Pracoviště pro měření intenzitního profilu optických svazků se skládá z pěti nejdůležitějších částí: PC, ESP301, M – IMS 400, detektor a Atmega16 se zesilovačem LM324. Zařízeními probíhá přes rozhraní RS232.



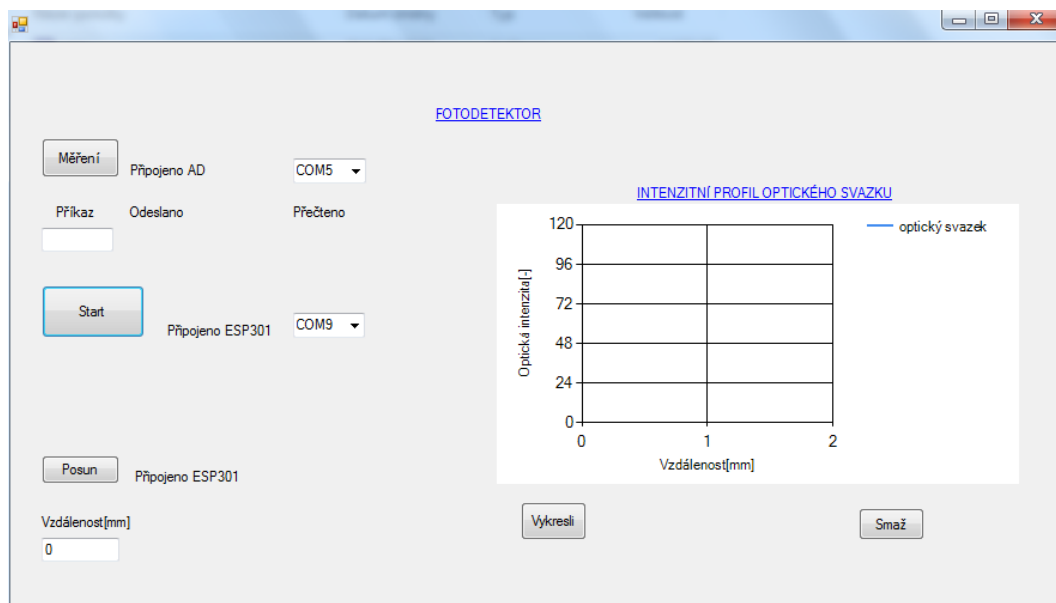
Obr. 7.2 Blokové schéma pracoviště

7.1 Obslužný program pro PC

K vytvoření obslužného programu byla použita knihovna s vytvořenými funkcemi pro ovládání ramene a komunikaci se sériovým portem [17].

Celé pracoviště je ovládáno z PC. V Microsoft Visual Studiu 2010 byla vytvořena uživatelská aplikace pro snadné ovládání posuvného ramene M - IMS 400 a zpracování naměřených dat z fotodetektoru. Okno aplikace je na Obr. 7.3.

V aplikaci jsou labely, které hned po připojení PC k zařízení ESP 301 a plošnému spoji fotodetektoru vypíší hlášku o stavu připojení a stavu odeslaných příkazů. Uživatel tak hned vidí, zda jsou obě zařízení připravena k činnosti nebo někde nastal problém. Při měření je okamžitě vidět, zda došlo k odeslání a přečtení instrukce a jestli jsou tak vykreslovány správné hodnoty.



Obr. 7.3 Okno uživatelské aplikace

Posun:

Dráha, po které se může posuvné rameno M – IMS 400 pohybovat je 800 mm. Pozice 0 je úplně vpravo. Při zadání kladné hodnoty se rameno pohybuje doleva, při zadání záporné hodnoty pak doprava. Hodnoty posuvu ramene se zadávají v mm.

Měření:

Tímto tlačítkem uživatel ovládá měření fotodetektoru. Posláním příkazu dojde k zapsání na sériový port, zahájí se A/D převod a následně jsou hodnoty přečteny ze sériového portu a zpracovány v PC.

Start:

Tlačítko spustí pohyb posuvu M – IMS 400 z jednoho konce na druhý. Měření se tak provede najednou a uživatel nemusí po každém změřené hodnotě zadávat hodnotu pro další posun.

Vykresli:

Zobrazí změřený profil optického svazku.

Smaž:

Vymaže aktuální graf zobrazující profil svazku a může proběhnout nové měření.

7.2 Popis programu mikrokontroléru

Základem správné funkce mikrokontroléru je především nastavení jednotlivých bitů, které používají vybrané registry. Jedná se tedy o registry určené pro A/D převod a komunikaci mezi procesorem a ostatními periferiemi.

Nastavení hlavní obslužné funkce main pro program procesoru Atmega16 je uveden níže. Celý kód je součástí přílohy práce. Tento kód je část projektu dostupného z [19]. Pro účely fotodetektoru je použita část, která obstarává A/D převod a komunikaci mezi zařízením a PC. Následně je s vhodnými úpravami nahrán do procesoru Atmega16, odkud je poslán řetězec hodnot, které odpovídají světelné intenzitě. Z tohoto řetězce jsou hodnoty vybrány a zakresleny do grafu.

```
int main( void )                //hlavní program - naplníme
                                registry a povolíme přerušení
{
    ADMUX=(1<<REFS0|0<<MUX0);    //AD0 převodník nastavení kanálu
    ADCSRA=(1<<ADPS2|1<<ADPS1|1<<ADPS0|1<<ADSC|1<<ADIFSC|1<<ADIFSC);
                                //povolení AD převodu, a nastavení
                                předděličky
    UCSRB=(1<<TXEN) | (1<<RXEN) | (1<<RXCIE);
                                // povolení vysílání UART
    UCSRC=(1<<UCSZ1) | (1<<UCSZ0) | (0<<USBS) | (0<<URSEL);
                                //asynchronní přenos
    UBRRL=FOSC/16/BAUD-1;
                                // nastavení rychlosti přenosu
                                reg1
    UBRRH=((FOSC/16/BAUD-1)>>8);
                                // nastavení rychlosti přenosu
                                reg2

    DDRC=0xFF;

    sei();                      //povolení přerušení
    while(1);                   //nekonečná smyčka - vyplnění
                                volného času
}
```

Převodník je nastavitelný programově. Pro tuto aplikaci se využívá několika registrů. Registr ADMUX slouží k nastavení referenčního napětí. Vnitřní napěťová reference je 5V napájecího napětí, musí být nastaveny REFS0 na 1 a MUX0 na 0.

7	6	5	4	3	2	1	0	
REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	ADMUX
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
0	0	0	0	0	0	0	0	

Obr. 7.4 Registr ADMUX [10]

ADCSRA zapíná A/D převodník, je potřeba nastavit: ADPS2, ADPS1, ADPS0 na 1 a ADATE, ADIE na 1.

7	6	5	4	3	2	1	0	
ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
0	0	0	0	0	0	0	0	

Obr. 7.5 Registr ADCSRA [10]

Registr UCSRB nastavuje komunikaci UART. Pro zajištění správné komunikace je potřeba nastavit TXEN, RXEN a RXCIE na 1.

7	6	5	4	3	2	1	0	
RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8	UCSRB
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W	
0	0	0	0	0	0	0	0	

Obr. 7.6 Registr UCSRB [10]

Pro zajištění správného přenosu dat je nutné nastavit v registru UCSRC: UCZ1, UCZO na 1 a USBS, URSEL na 0.

7	6	5	4	3	2	1	0	
URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL	UCSRC
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
1	0	0	0	0	1	1	0	

Obr. 7.7 Registr UCSRC [10]

V registrech UBRRL a UBRRH se nastavuje potřebná rychlost přenosu.

8 OVĚŘENÍ METODY PRO MĚŘENÍ INTENZITNÍHO PROFILU OPTICKÝCH SVAZKŮ

Předmětem následující kapitoly bude ověření teoretických výsledků, které byly získány ze simulací gaussova svazku. Pomocí navrženého fotodetektoru bude proměřen laserový svazek ($\lambda = 633 \text{ nm}$), který dopadá kolmo na fotodetektor a svazek šířící se k fotodetektoru po odrazu od dvou zrcadel. Ve druhém případě dochází k rozšiřování svazku, po překročení Rayleighovy vzdálenosti, jak plyne z teorie optických svazků.

8.1 Měření pomocí fotodetektoru

Podmínky:

Kontrolní měření fotodetektorem bylo prováděno ve školní laboratoři Optických komunikací, na Ústavu radioelektroniky VUT. Měření bylo prováděno za úplné tmy, při zatažených okenních roletách. Fotodetektor byl umístěn na posuvném stojanu M – IMS 400 ve vzdálenosti 2 m od He – Ne laseru s vlnovou délkou 633nm. Následně bylo provedeno ještě jedno měření, aby byla ověřena teorie rozšiřujícího se optického svazku, kdy laser byl ve stejné vzdálenosti, ale paprsek putoval k fotodetektoru přes dva odrazy od vhodně umístěných zrcadel, takže celková vzdálenost byla 6 m.

Princip měřicí metody:

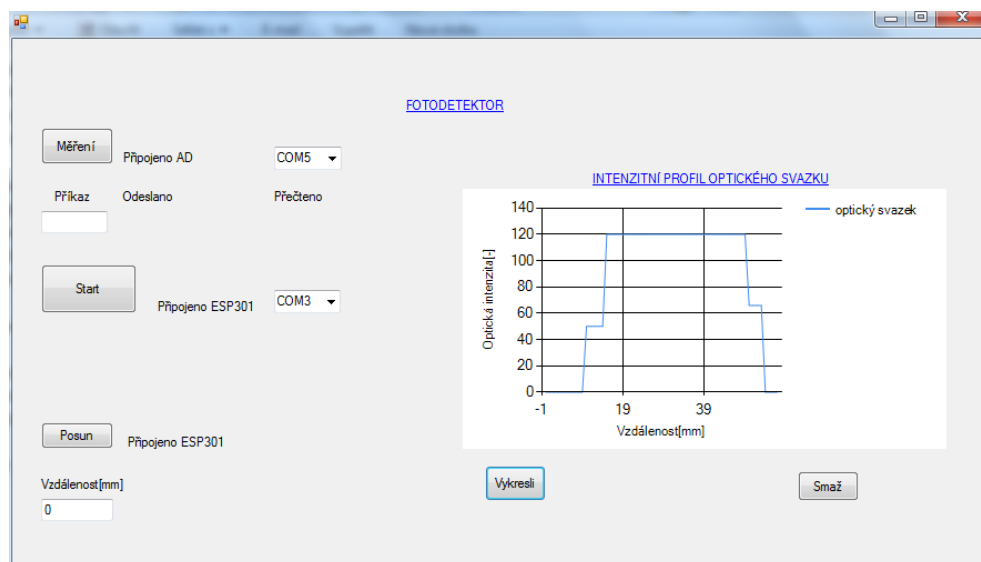
Všechna potřebná nastavení provádí uživatel přímo v PC, ve vytvořené aplikaci. Výběr sériového portu (z jednoho portu probíhá komunikace s fotodetektorem a z druhého portu je ovládán posun ramene). Poté je spuštěno vlastní měření.

Při měření se využívá dvou funkcí: WriteString a ReadChar. WriteString pošle na sériový port znak “v0p1”, což aktivuje interní A/D převodník procesoru Atmega16. Znak “v0” otevře kanál a zahájí A/D převod na pinu PA0. Znak “p1” určuje, kolik vzorků bude odesláno. Hodnoty jsou podle intenzity optického záření posílány na sériový port. Funkce ReadChar přečte hodnoty ze sériového portu a naplní jimi buffer. V bufferu jsou hodnoty uloženy jako pole znaků. Při každém novém měření jsou hodnoty v bufferu přepsány. Do grafu se tak vykreslují hodnoty postupně, po každém měření a vždy se vybírá první znak v řetězci.

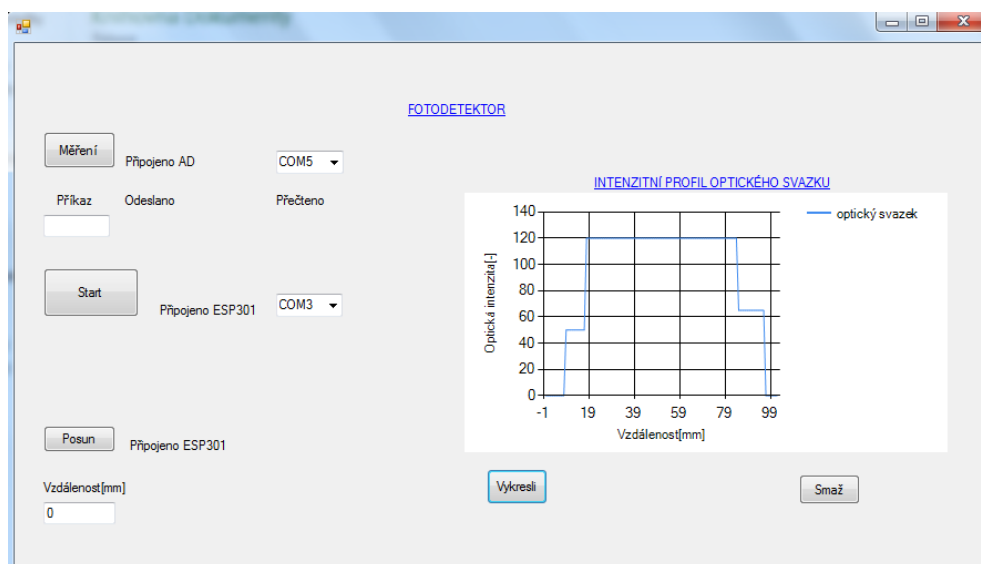
Program nabízí dva měřicí módy:

- 1) Tlačítkem “Start” se spustí posun ramene z jedné strany na druhou, při tom se zaznamenávají naměřené hodnoty do bufferu a poté je vykreslen výsledný graf.
- 2) Druhou možností je použít tlačítko “Posun”, kdy si uživatel zvolí krok měření a po tomto kroku posouvá rameno stojanu a po každém posunutí se vykreslí hodnota do grafu. Tento způsob měření lze využít např. při proměření hodnot určité oblasti.

Na Obr. 8.1 jsou vidět naměřené hodnoty optického svazku svítícího přímo na fotodetektor, ze vzdálenosti 2m. Obr. 8.2 znázorňuje naměřené hodnoty u rozšiřujícího se optického svazku. U rozšířeného svazku byla detekována zvýšená světelná intenzita na větší vzdálenosti, jak plyne ze samotného obrázku.



Obr. 8.1 Profil laserového svazku (633 nm)



Obr. 8.2 Profil rozšířeného laserového svazku (633 nm)

Z naměřených výsledků aplikace *Fotodetektor* je vidět, že na začátku měření, kdy ještě není detekován laserový svazek, se objevují hodnoty nenulové úrovně. Na začátku měření se dá očekávat hodnoty nulové úrovně hodnot laserového záření, případně hodnoty hodně malé, protože laserový paprsek se nachází mimo fotodiodu. Po dobu

působení laserového záření na fotodiodu hodnota intenzity záření vzroste na hodnotu 120 a po celou dobu detekce laserového záření je tato hodnota konstantní. Na konci svazku a mimo optický svazek se poté opět objevují nenulové hodnoty intenzity záření.

V programu Hyperterminal

Při měření napětí na fotodiodě, v době detekce laserového záření, se mění hodnoty napětí od 0,03 V do hodnoty 3,7 V.

Řešením uvedeného problému může být úprava fotodetektoru, kdy zesílení zesilovače LM324 bude uživatel nastavovat pomocí dvou odporových trimrů (jeden pro hrubé a druhý pro jemné ladění zesílení). Tím by měla být zajištěna podstatně lepší citlivost detekovaného optického záření.

Další úpravou může být taky doladění samotného A/D převodu.

9 ZÁVĚR

V úvodní části této práce je rozebrána problematika týkající se optických svazků generovaných různými zdroji záření. Od obyčejné teorie přes matematický, fyzikální popis až po rozdělení a druhy optických svazků. V další části práce jsou představeny komerčně dostupné systémy používané pro zkoumání optických svazků. Zbývající kapitoly popisují konstrukci fotodetektoru a uživatelské aplikace, pro studium intenzitního profilu optických svazků.

Při řešení této práce bylo použito několik softwarů. V programu MATLAB® byla vytvořena aplikace na simulaci gaussova svazku. gaussov svazek na počátku a na konci oblasti šíření. Simulace ukazují rozšiřování gaussova svazku při šíření danou oblastí. Vstupními parametry jsou oblast, počet vzorků, vlnová délka a pološířka svazku. Po zadání těchto hodnot je vypočítána Rayleighova vzdálenost, která je potřebná pro správné zadání hodnoty oblasti šíření optického svazku. Oblast šíření musí být totiž větší, než je vypočítaná Rayleighova vzdálenost, aby byla splněna podmínka pro rozšíření optického svazku, jinak nebude možné si prohlédnout rozdíl mezi svazkem v počátku a na konci oblasti šíření. Zdrojový kód programu je uveden v příloze.

Základem práce bylo navrhnout a zkonstruovat fotodetektor. Desky plošných spojů byly navrhnuty v programu Eagle 5.6.0. Poté byla tato deska plošného spoje vyrobena ve školní dílně. Jednou z částí fotodetektoru je procesor Atmega16. Procesor Atmega16 byl naprogramován pomocí softwaru AVR Studio 4 a vývojové desky STK500 od Atmelu. Nakonec byl zkonstruován celý fotodetektor. Ten byl poté přišroubován na odleptanou desku z materiálu FR4 a následně se to celé přišroubovalo na stojan posuvného ramene, viz přílohy – fotodokumentace.

V programu Microsoft Visual Studio 2010 byla navrhnutá uživatelská aplikace pro ovládání posuvného ramene M – IMS 400 s připevněným fotodetektozem a zpracování naměřených hodnot fotodetektozem.

Výsledkem je tedy plně automatizované pracoviště, kdy uživatel ve své aplikaci v PC ovládá posun posuvného ramene M – IMS 400 do oblasti laserového záření. Navržený fotodetektor reaguje na změny světelné intenzity, takže je dobře patrné, kdy je detekováno laserové záření. V grafu se však zobrazují pouze 4 úrovně světelné intenzity. Problémem bude nejspíš malá citlivost fotodiody. Pro větší citlivost fotodetekce a dosažení přesnějších hodnot A/D převodu by bylo vhodné použít 2 odporové trimry (hrubé a jemné ladění odporu ve zpětné vazbě invertujícího zesilovače LM324).

Vytvořená aplikace je funkční a použitelná pro zkoumání laserových svazků. Jednou z možných úprav je zdokonalení programu pro A/D převodu. Možností zdokonalení představeného fotodetektoru může být použití odporových trimrů pro zvýšení zesílení přijímaného signálu, v případě použití laserů s malým optickým výkonem.

LITERATURA

- [1] WILFERT, O. *Kvantová a laserová elektronika* [online]. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012, 141 s. ISBN 978-80-214-4493-5.
- [2] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995.
- [3] (M -) IMS Series, High – Performance Long – Travel Linear Stages, *User's Manual*. Dostupné z www:
http://assets.newport.com/webDocumentsEN/images/IMS_Data_Sheet_MC.PDF
- [4] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. *Bez kabelové spoje velkého dosahu*, Brno: Brno University of Technology, 2009, 14- 17s. ISBN80-214.
- [5] MAJUMDAR, A. K., RICKLIN, J. C. *Free – Space Laser Communications: Principles And Advances*. New York: Springer, 2007.
- [6] JOHNSON, D. A., *Handbook of Optical Through the Air Communications*.
- [7] BASS, M., STRYLAND, V., W., E., WILLIAMS, D. R., WILLIAM, L. WOLFE, *Handbook of Optics*, Optical Society of America, 1995.
- [8] CSELE, M. *Fundamentals of Light Sources and Lasers*, New Jersey, 2004.
- [9]TING CHUNG, P., TAEGEUN, K. *Engineering Optics with Matlab*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006.
- [10] Datasheet mikrokontroléru Atmega16. Atmel, 315 s. Dostupné na www:
<http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>
- [11] ŠUTA, V. *Automatický posuv pro digitální zapisovač dat*, Brno, 2011. Diplomová práce, VUT – Vysoké učení technické Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Radioelektroniky.
- [12] MÜLLER, T. *Digitální zapisovač dat*, Brno, 2011. Diplomová práce, VUT – Vysoké učení technické Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Radioelektroniky.
- [13] ŠKRHÁK, L. *Dálkově řízený robot*, Jihlava, 2013. Bakalářská práce, Vysoká škola polytechnická Jihlava, Obor počítačové systémy, Katedra elektrotechniky a informatiky.
- [14] Datasheet fotodiody BPW34, 5 s. Dostupné na www:
<http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- [15] HAJNOVÁ, A. *Diagnostika laserových svazků*, Olomouc, 2010, Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, Katedra optiky.
- [16] Datasheet zesilovače LM324, 15 s. Dostupné na www:
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/310/012/lm324-datasheet-1.pdf>
- [17] Osc – radar. Code.google.com. [online]. 17.5.2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné na www: <https://code.google.com/p/osc-radar/source/browse/esp301-control/>

[18] Ubeam Brochure, 2 s. Dostupné na www: <http://www.duma.co.il/ubeam.html>

[19] MMIA–FTDI FT235. MMIA–FTDI FT235. [online]. 17.5. 2014 [cit. 2014-05-20]. Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MIA/2009/dusek/index.html>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

N	koncentrace částic
B	Einsteinův koeficient indukovaného přechodu
W	hustota pravděpodobnosti indukovanosti přechodů
w_0	pološířka svazku
β	koeficient zesílení
τ	doba života částicvaná oblast
k	vlnové číslo
L	zobrazovaná oblast
z	vzdálenosti
U	komplexní amplituda gaussova svazku
$W(z)$	pološířka svazku
∇	Laplaceův operátor
$R(z)$	poloměr křivosti svazku
P	výkon
I	optická intenzita
Λ	vlnová délka
Θ	divergence svazku
M	příčné zvětšení
U	elektrické napětí
I	elektrický proud
G	Gaussova funkce
Z	funkce záření

PŘÍLOHY

Zdrojový kód programu: Simulace Gaussova svazku v Matlabu

```
%Gaussův svazek

pocet_vzorku =get(findobj('tag','vzorky'),'string');
pocet_vzorku = str2num(pocet_vzorku);
oblast =get(findobj('tag','oblast'),'string');
oblast = str2num(oblast);
oblast=oblast*1e-3;
lambda=get(findobj('tag','lambda'),'string');
lambda = str2num(lambda);
lambda=lambda*1e-9;
k=(2*pi)/lambda;
polosirka= get(findobj('tag','polosirka'),'string');
polosirka = str2num(polosirka);
polosirka=polosirka*1e-3;
rayli_vzdalenost=(k*polosirka^2)/2*1e3;
sprintf('Rayleighova vzdálenost je %f [mm] ', rayli_vzdalenost)
set(handles.rayli,'String',rayli_vzdalenost);
oblast_sireni= get(findobj('tag','oblast_sireni'),'string');
oblast_sireni = str2num(oblast_sireni);
oblast_sireni=oblast_sireni*1e-3;

%Velikost kroku
velikost=oblast/pocet_vzorku;

for n= 1:pocet_vzorku+1
    for m=1:pocet_vzorku+1

        %Místo na ose
        x(m)=(m-1)*velikost-oblast/2;
        y(n)=(n-1)*velikost-oblast/2;

        %Gaussův svazek v prostoru
        Gaus_svazek(n,m)=exp(-(x(m)^2+y(n)^2)/(polosirka^2));

        %Frekvenční osa
        Kx(m)=(2*pi*(m-1))/(pocet_vzorku*velikost)-
        ((2*pi*(pocet_vzorku))/(pocet_vzorku*velikost))/2;
        Ky(n)=(2*pi*(n-1))/(pocet_vzorku*velikost)-
        ((2*pi*(pocet_vzorku))/(pocet_vzorku*velikost))/2;

        %Vlnný prostor a přenosová funkce šíření
        Zareni(n,m)=exp(j/(2*k)*oblast_sireni*(Kx(m)^2+Ky(n)^2));
    end
end

%Gaussův svazek ve frekvenční oblasti
F_Gaus=fft2(Gaus_svazek);
```

```

F_Gaus=fftshift(F_Gaus);

%Šíření Gaussova svazku ve frekvenční oblasti
Gaus_sireni=F_Gaus.*Zareni;

%Maximální amplituda počátečního svazku
Amplituda=max(max(abs(Gaus_svazek)));
sprintf('Maximální amplituda je %f [-]', Amplituda)

%Šíření Gaussova svazku v otevřeném prostoru
Gaus_prostor=ifft2(Gaus_sireni);
Gaus_prostor=Gaus_prostor;

%Maximální amplituda šířícího se svazku
Amplituda2=max(max(abs(Gaus_prostor)));
sprintf('Amplituda šířícího se svazku je %f [-]', Amplituda2)

%Vypočítaná šířka svazku
[N M]=min(abs(x));
Gaus_prostor2 =Gaus_prostor(:,M);
[N1 M1]= min(abs(abs(Gaus_prostor2)- abs( exp(-1)*Amplituda2)));
Sirka_svazku=velikost*abs(M1-M)*10^3;
sprintf('Šířka svazku je %f [mm]', Sirka_svazku)
set(handles.sirka,'String',Sirka_svazku);

%Teoretická šířka svazku
Sirka_svazku_teoretik=(2*rayli_vzdalenost)/k*(1+(oblast_sireni/rayli_v
zdatenost)^2);
Sirka_svazku_teoretik=(Sirka_svazku_teoretik^0.5)*10^3;
sprintf('Teoretická šířka svazku je %f [mm]', Sirka_svazku_teoretik)
set(handles.teoreticka_sirka,'String',Sirka_svazku_teoretik);

%Osy v mm měřítku
x=x*10e3;
y=y*10e3;

mesh(handles.figure2,x,y,abs(Gaus_svazek))
%title('Pocatecni Gaussuv svazek')
set(get(handles.figure2,'Title'),'String','Pocatecni Gaussuv
svazek');
xlabel('x [mm]')
ylabel('y [mm]')
axis([min(x) max(x) min(y) max(y) 0 1])
axis square

mesh(handles.figure3,x,y,abs(Gaus_prostor))
%title('Sireni Gaussova svazku')
set(get(handles.figure3,'Title'),'String','Sireni Gaussova svazku');
xlabel('x [mm]')
ylabel('y [mm]')
axis([min(x) max(x) min(y) max(y) 0 1])
axis square

```

Popis programu mikrokontroléru:

[19]

```
int main( void )                //hlavni program - zde naplnime
                                registry a povolime preruseni

{
    ADMUX=(1<<REFS0|0<<MUX0); //AD0 převodník nastaveni kanalu
    ADCSRA=(1<<ADPS2|1<<ADPS1|1<<ADPS0|1<<ADSC|1<<ADIFSC|1<<ADIFSC);
                                //povoleni AD přev, a
    nastavenipredelicky
        UCSRB=(1<<TXEN) | (1<<RXEN) | (1<<RXCIE);
                                // povoleni vysilani UART

        UCSRC=(1<<UCSZ1) | (1<<UCSZ0) | (0<<USBS) | (0<<URSEL);
                                //8bit slovo, asynch prenos

        UBRRL=FOSC/16/BAUD-1;
                                // NASTAVENI RYCHLOSTI prenosu
                                reg1
        UBRRH=((FOSC/16/BAUD-1)>>8);
                                // NASTAVENI RYCHLOSTI prenosu
                                reg2

        DDRC=0xFF;

    sei();                      //povoleni preruseni
    while(1);                   //nekonecna smycka - pro vyplneni
    volnych chvil
}

ISR( ADC_vect )                // preruseni kdzy skonci AD prevod
{
    i++;                        //pricte jednnicku k cislu vzorku

    loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //ceka na povoleni
    vysilani
        UDR=ADCH&0b00000011;    //vysle prvni pulku dat

    loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //ceka na povoleni
    vysilani
        UDR=ADCL;                // posila druhou pulku
    dat
```

```

        loop_until_bit_is_set(UCSRA, UDRE);          //ceka na povoleni
vysilani
        UDR=i;                                       // vysle cislo vzorku

        pocet--;                                    //odecte jedno mereni

        if (pocet<1)                                // je-li posledni
mereni pocet=0
        {
            ADCSRA&=~(1<<ADEN);                     //vypne AD prevod
            loop_until_bit_is_set(UCSRA, UDRE);        //ceka na povoleni
vysilani
            UDR=0x0A;                                 // oprv vysle znak LF
(ASCII)
            loop_until_bit_is_set(UCSRA, UDRE);        //ceka na povoleni
vysilani
            UDR=0x0D;                                 // opr vysle znak CR
(ASCII)
        }
        else
        {
            PORTC = 0b000000010;
            _delay_ms(50);
            PORTC = 0b000000001;
            _delay_ms(3000);
        }
    }

ISR( USART_RXC_vect )                               //preruseni pri prijmu ramce USART
{
    switch (test) {
        case 1:                                       //je-li test=1 tj. pozadavek na
vstup
            nastav_kanal (UDR);                       // vyvola funkci nastaveni vstupu
(bin data)
            test = 0;                                 // nulovani polozky TEST - default
hodnota
            break;
    }
}

```

```

default:
switch (UDR) {
    case 'v':                                //prijde-li pozadavek na kanal
        test = 1;
        break;

    case 'p':                                //prijde-li pozadavek nastavení
A/D převodu
        test = 2;

        break;

    default:
        loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
                                                //ceka na povoleni vysilani
        UDR=0xf9;                            // kod chyba
        break;
    }
    break;
}

void nastav_prevod(uint8_t poc)
{if (UDR>0)
{
    pocet=poc;
// prijme měření
    loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); // ceká na povoleni
vysilani
    UDR=pocet;                                // vysle zpet pocet
mereni
    ADCSRA|=(1<<ADEN|1<<ADSC);                // povoli a spusti AD
prevodnik
}

}

void nastav_kanal(uint8_t vstup)
{
    if ((vstup<9)&&(vstup>0))                    // cislo znaku musi byt
mensi jak 8

{

```

```

ADMUX=(1<<REFS0|(vstup-1)<<MUX0);
// nastavi vstup AD

prevodniku

loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
//ceka na povoleni vysilani

UDR=ADMUX;
// poznavaci kod pro odpoved
na dotaz na port

}
else
{
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
//čeká na povolení vysílání

UDR=0xf9;
//chyba
}

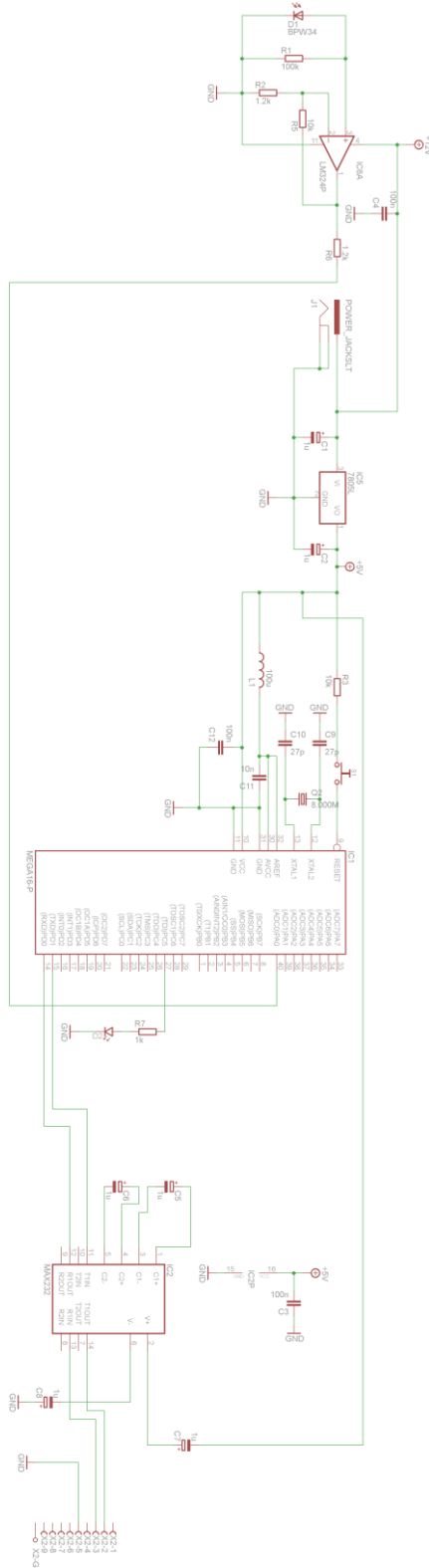
```

SEZNAM PŘÍLOH

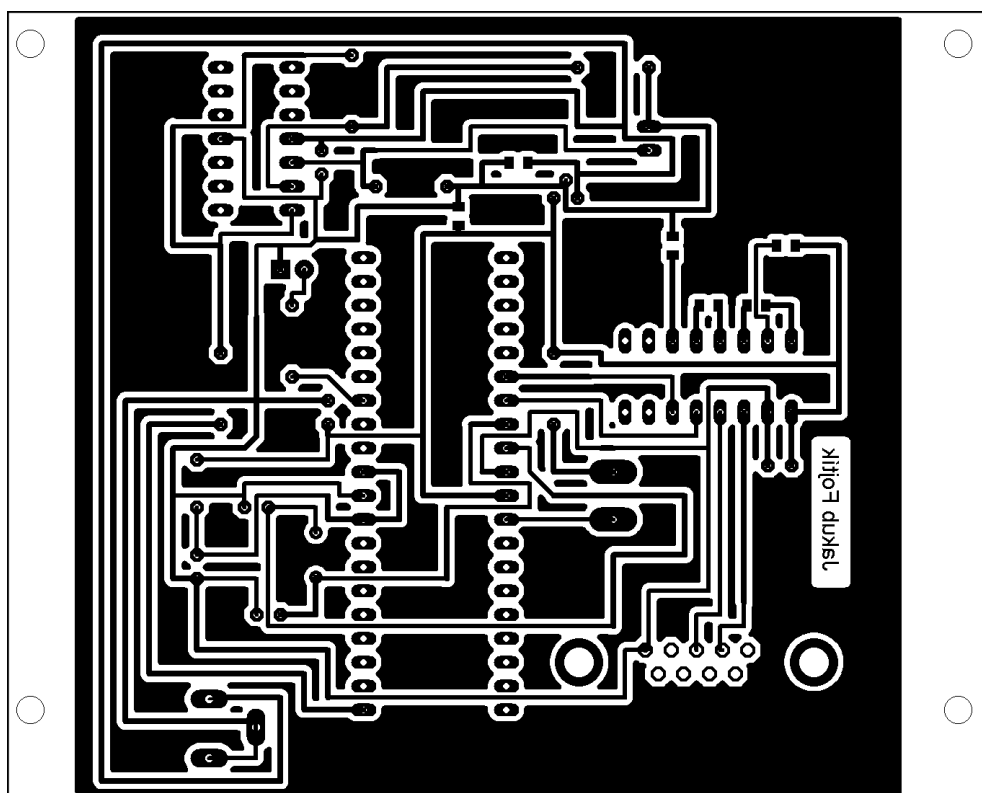
A	Návrh zařízení	59
A.1	Schéma fotodetektoru	59
A.2	Deska plošného spoje – bottom (strana součástek)	60
A.3	Osazovací výkres – bottom	61
B	Seznam součástek	62
C	Fotopříloha	63
C.1	Fotodetektor	63
C.2	Automatizované pracoviště	64
C.3	Fotodetektor za provozu	65

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Schéma fotodetektoru

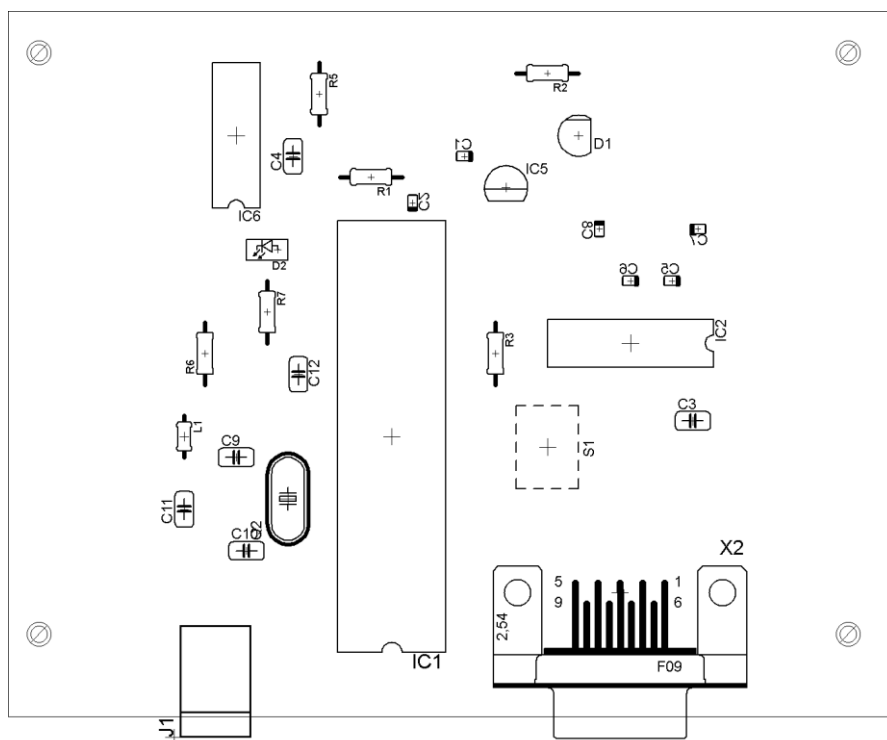


A.2 Deska plošného spoje – bottom (strana součástek)



Rozměr desky 109,22 × 86,36[mm], měřítko M1:1

A.3 Osazovací výkres – bottom



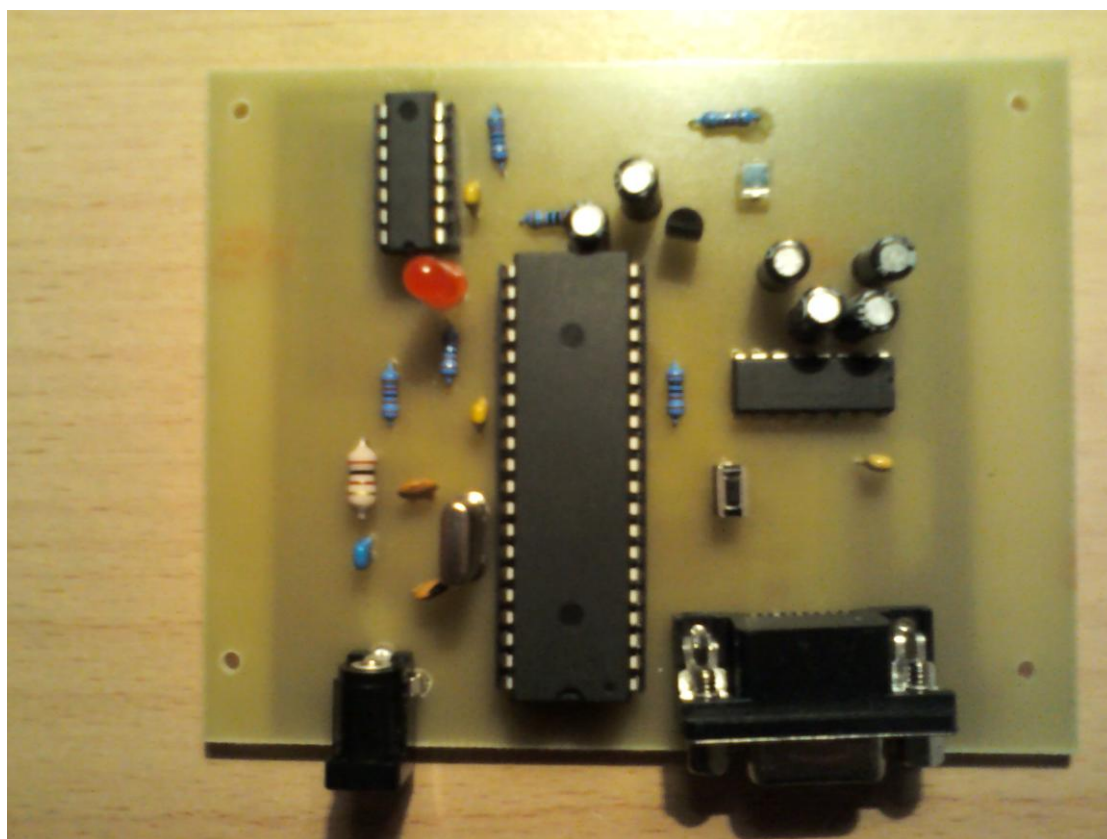
Rozměr desky 109,22 × 86,36[mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

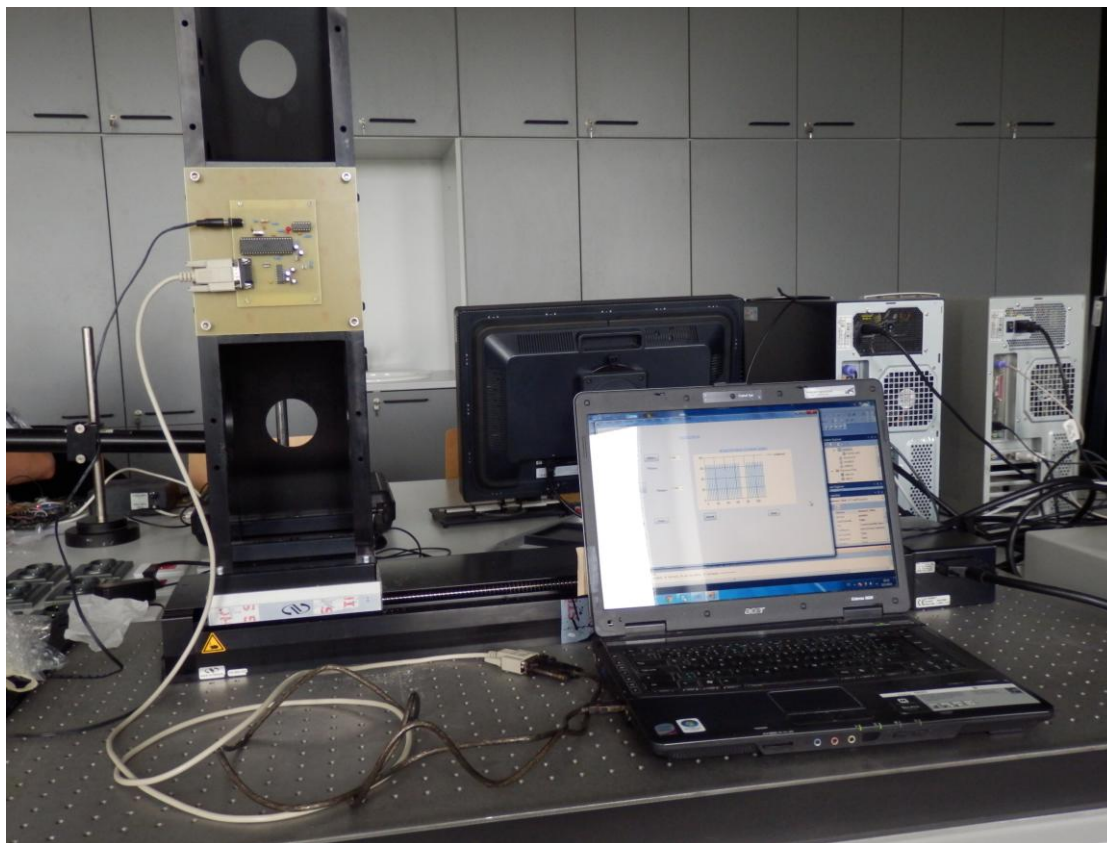
Označení	Hodnota	Pouzdro	Počet
C1, C2, C5, C6, C7 ,C8	1u	SMC_Z	6
C3, C4, C12	100n	C025-024X044	3
C9, C10	27p	C025-024X044	2
C11	10n	C025-024X044	1
C12	100n	C025-024X044	1
D1	BPW34	BPW34	1
IC1	MEGA16-P	DIL40	1
IC2	MAX232	DIL16	2
IC5	7805L	TO92	1
IC6	LM324P	DIL14	1
J1	POWER_JACKSLT	POWER_JACK_SLOT	1
L1	100u	0204/5	1
Q2	8.000M	HC49U70	1
R1	100k	0204/7	1
R2	1.2k	0204/7	1
R3, R5	10k	0204/7	2
R6	1.2k	0204/7	1
S1	TLACITKO	PLOSKA-2X	1
X2	KONEKTOR RS232	F09HP	1
R7	1k	0204/7	1
D2	LED_2,5X5	LED_2,5X5	1

C FOTOPŘÍLOHA

C.1 Fotodetektor



C.2 Automatizované pracoviště



C.3 Fotodetektor za provozu

