VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ NUMERICKÉ APERTURY

MEASUREMENT OF THE NUMERICAL APERTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE TOMÁŠ VEJMOLA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. SOŇA ŠEDIVÁ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student:	Tomáš Vejmola	***ID:***	115308
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření numerické apertury

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Proveďte literární rešerši v oblasti měření numerické apertury optických vláken a v oblasti měření směrové charakteristiky optických zdrojů (zaměřit se na LED).
2) Změřte numerickou aperturu předložených optických vláken pomocí měřicího systému SOMS. Ověřte vliv otevření a zavření víka při měření u systému SOMS.
3) Navrhněte úpravu systému pro měření směrové charakteristiky zdrojů světla.
4) Navrhněte metodiku měření směrové charakteristiky zdrojů světla a proveďte vlastní měření. Naměřené výsledky zpracujte a zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1.SALEH, B. E. A., TEICH, M. C.- Základy fotoniky. Matfyz Press, Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6
2. Uživatelský manuál SYNC 2.0 od firma Safibra

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	30.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce ukazuje použití měřicího systému SOMS pro měření numerické apertury různých druhů optických vláken. Dále je v práci popsán a odzkoušen měřicí přípravek, umožňující modifikovat systém SOMS pro měření vyzařovacích charakteristik a úhlů LED diod o průměrech 3mm, 5mm a 8mm.

Klíčová slova

Numerická apertura (NA), LED dioda, optické vlákno, SOMS, vyzařovací charakteristika, měřicí systém

Abstrakt

Bachelor thesis illustrates the use measuring systems for measuring the numerical apertures of various kinds of optical fibers. The study also described and tested measuring device, to modify the system for measuring radiation characteristics and angle of LED 3mm, 5mm and 8mm.

Keywords

Numerical aperture (NA), light emitting diode (LED), optical fiber, SOMS, radiation pattern, measuring system

Bibliografická citace:

VEJMOLA, T. *Měření numerické apertury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011, 54 s. Vedoucí bakalářské práce byla Ing. SOŇA ŠEDIVÁ, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Měření numerické apertury* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a s použitím odborné literatury i dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v textu a uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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., dílu 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **27. května 2011** ……

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Děkuji také panu Janu Vodičkovi za technickou realizaci mého návrhu uchycení LED diod.

V Brně dne: **27. května 2011** ……

podpis autora

OBSAH

1 SEZNAM OBRÁZKŮ 9
2 SEZNAM TABULEK 9
3 ÚVOD 10
4 OPTICKÉ VLÁKNO 11
4.1 Jednovidové optické vlákno 13
4.1.1 Vlastnosti jednovidového vlákna 13
4.2 Vícevidové optické vlákno 14
4.2.1 Vlákno se skokovým indexem lomu 14
4.2.2 Vlákno gradientní 14
4.2.3 Typy vícevidových vláken 15
5 LUMINISCENČNÍ DIODY (LED) 16
5.1 Historie 16
5.2 Princip funkce 16
5.3 Provedení 17
5.3.1 Základní LED diody 17
5.3.2 Segmentové displeje 18
5.3.3 LED displeje a panely 19
5.3.4 LED osvětlení 20
6 NUMERICKÁ APERTURA 21
6.1 Hodnoty NA pro jednotlivé typy vláken 23
7 VYZAŘOVACÍ ÚHEL LED DIODY 24
8 MĚŘENÍ NUMERICKÉ APERTURY 25
8.1 Princip měření numerické apertury 26
8.1 Kontinuální režim měření 27
8.1 Synchronní režim měření 27
9 MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK LED DIOD 28
10 MĚŘICÍ SYSTÉM SOMS UMOŽŇUJÍCÍ MĚŘIT NUMERICKOU APERTURU A PARAMETRY LED 30
10.1 Popis měřicího systému 30
11 TVORBA A NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO UCHYCENÍ LED DIOD 32
11.1 Popis a ukázka přípravku 32
11.2 Popis a ukázka uchycení přípravku v systému SOMS 33

12 VLASTNÍ MĚŘENÍ NUMERICKÉ APERURY POMOCÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU SOMS ... 35
12.1 Postup při měření numerické apertury (NA) ... 35
12.2 Výsledky měření a grafy ... 37
12.2.1 Měření zdrojového vlákna záření ... 37
12.2.2 Měření vlákna SM9/125µm ... 38
12.2.3 Měření vlákna Y035311 ... 39
12.2.4 Měření vlákan GI62,5 ... 40
12.3 Shrnutí měření NA pomocí měřicího systému SOMS ... 41
13 VLASTNÍ MĚŘENÍ LUMINISCENČNÍCH DIOD POMOCÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU SOMS ... 42
13.1 Zpracování výsledů měření ... 42
13.2 Zadané LED diody k proměření a otestování přípravku k uchycení ... 43
13.3 Naměřené hodnoty a grafy ... 43
13.3.1 Měření LED diody číslo 1 označené BLUE DARK ... 44
13.3.2 Měření LED diody číslo 3 označené RED ... 45
13.3.3 Měření LED diody číslo 8 označené BLUEGREEN ... 46
13.3.4 Měření LED diody číslo 12 označené IR ... 47
13.4 Shrnutí měření LED diod pomocí měřicího systému SOMS ... 48
14 ZÁVĚR ... 50

1 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Druhy optických vláken [1] 12
Obr. 2 Svazek optických vláken[1] 12
Obr. 3 Ukázka náčrtu a pouzdra LED - 5mm [12] 17
Obr. 4 Ukázka různých segmentových displejů 19
Obr. 5 Ukázka LED panelu a LED dekorace na budově 19
Obr. 6 LED žárovky s paticí E27 (vlevo) a MR16 (vpravo) 20
Obr. 7 LED halogen 20
Obr. 8 Přenos paprsku v ideálním optickém vlákně 21
Obr. 9 Pohyb paprsku vláknem [13] 22
Obr. 10 Princip měření vyzařovacího úhlu LED diody 24
Obr. 11 vyzařovací charakteristiky GI optického vlákna [9] 26
Obr. 12 Princip měření NA 26
Obr. 13 Princip měření LED diod 28
Obr. 14 Ukázka zpracování a vynesení hodnot po proměření LED diody 29
Obr. 15 Měřicí systém SOMS 31
Obr. 16 Ukázka předního, bočního a zadního náhledu na přípravek 33
Obr. 17 Ukázka upevnění přípravku na měření LED v měřicím systému SOMS 34
Obr. 18 Vyzařovací charakteristika vlákna zdroje záření 37
Obr. 19 Vyzařovací charakteristika vlákna SM9/125μm 38
Obr. 20 Vyzařovací charakteristika vlákna Y035311 39
Obr. 21 Vyzařovací charakteristika vlákna GI62,5 40
Obr. 22 Vyzařovací charakteristika LED diody č.1 označené BLUE DARK 44
Obr. 23 Vyzařovací charakteristika LED diody č.3 označené RED 45
Obr. 24 Vyzařovací charakteristika LED diody č.8 označené BLUEGREEN 46
Obr. 25 Vyzařovací charakteristika LED diody č.12 označené IR 47

2 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty úbytků napětí na LED diodách při 20mA [12] 18
Tab. 2 Parametry určitých typů vláken [10] 23
Tab. 3 Parametry LED diod k otestování přípravku 43
Tab. 4 Výsledky měření LED diod 48

3 ÚVOD

Účelem této bakalářské práce je otestování měřicího systému SOMS společnosti SAFIBRA s.r.o., určeného převážně k měření numerické apertury (NA) optických vláken. Dalším cílem bakalářské práce je rozšíření aplikačních možností systému SOMS pro měření vyzařovacích charakteristik luminiscenčních diod (LED). Toho je dosaženo návrhem a realizací přípravku, který modifikuje uvedený systém tak, aby byl schopen bez nutnosti velkých změn měřit nejen NA, ale také vyzařovací úhly různých LED zdrojů. Takto rozšířený měřicí systém by měl dále sloužit k výukovým účelům pro studenty VUT Brno.

Optická vlákna jsou v poslední době stále více využívána nejen na poli komunikačních technologií, ale i v oblasti měřicí techniky. Pro správné použití je potřeba znát základní parametry vláken, mezi něž patří i numerická apertura. Její měření je možné v laboratorních podmínkách prostřednictvím systému SOMS, který je na Ústavu automatizace a měřicí techniky k dispozici jak k výukovým potřebám, tak také k experimentálnímu využití.

Stejně jako u optických vláken, tak také u LED diod dochází v současnosti k výraznému nárůstu jejich aplikací. Děje se tak nejen v telekomunikační technice k přenosu dat, ale nově i jako zdrojů osvětlení nebo při výrobě LED televizorů jako nejnovějších prvků zobrazovacích jednotek. A stejně jako u optických vláken, tak také u LED diod je k jejich správnému použití potřeba znát příslušné parametry, aby jejich využití bylo co nejefektivnější.

To je také důvod, proč je snaha rozšířit aplikační možnosti systému SOMS o měření vyzařovacích charakteristik LED diod.

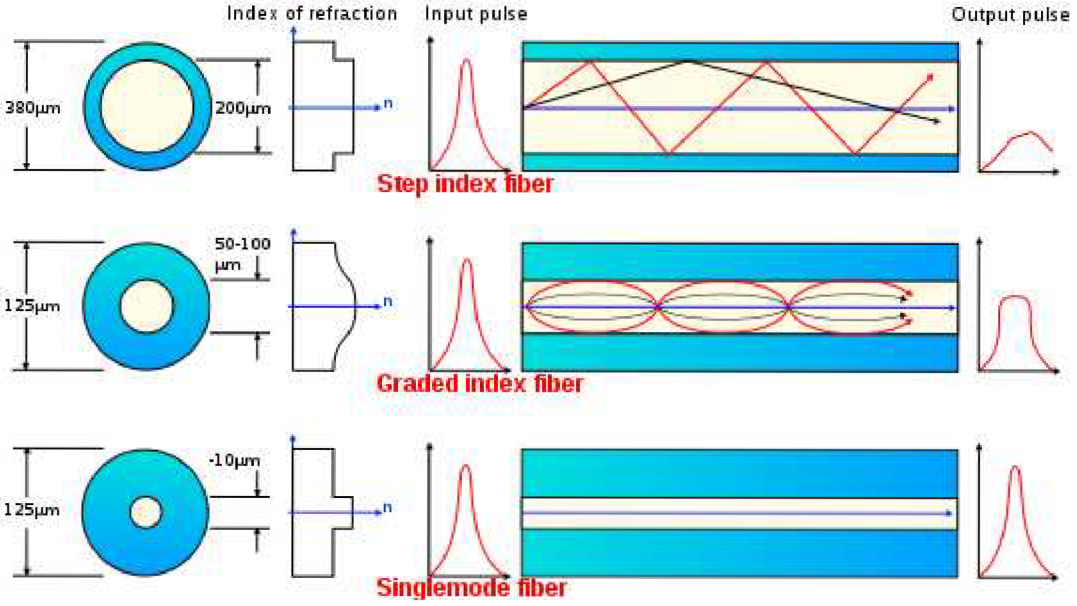
4 OPTICKÉ VLÁKNO

Optické vlákno je skleněné nebo plastové vlákno, které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy. Optická vlákna jsou široce využívána v komunikacích, kde umožňují přenos na delší vzdálenosti a při vyšších přenosových rychlostech dat, než jiné formy komunikace. Vlákna se používají místo kovových vodičů, protože signály jsou přenášeny s menší ztrátou a zároveň jsou vlákna imunní vůči elektromagnetickému rušení. Optická vlákna se používají také pro osvětlení a jsou pak balena v silných svazcích. Speciálně konstruovaná vlákna se používají pro řadu dalších aplikací, včetně snímačů a vláknového laseru.

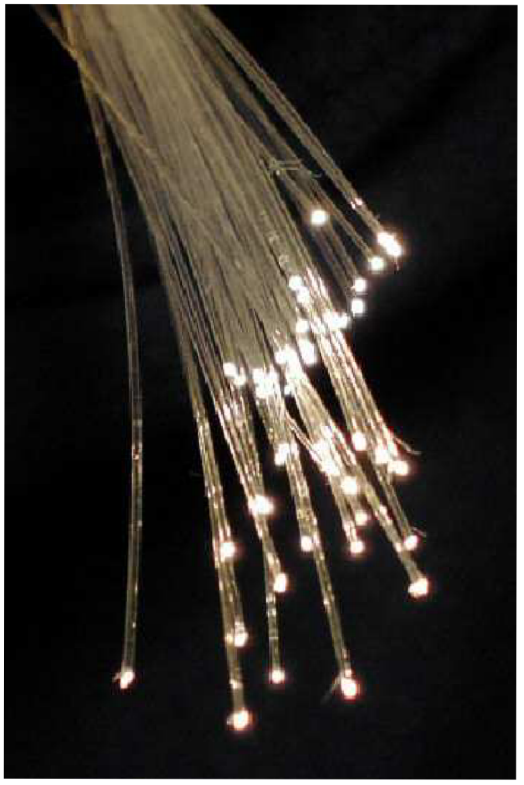
Optické vlákno je válečkový dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla světlo či infračervené záření) ve směru osy vlákna s využitím principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní část vlákna se nazývá jádro, okolo jádra je plášť a primární ochrana. K vazbě optického signálu na jádro musí být index lomu jádra vyšší, než má obal. U optických vláken se udává průměr jádra a pláště v mikrometrech. V datových sítích se používají zejména mnohavidová vlákna (MM) o průměrech 50/125 μm (standardizováno ITU-T podle G.651) nebo 62,5/125 μm (použití především v USA). V telekomunikacích se dnes používají výhradně jednovidová vlákna (SM) o průměru 9/125 μm. Jedná se především o standardy G.652, G653, G.655 a G. 657.

Skleněná optická vlákna jsou téměř vždy vyrobená z křemene, ale některé další materiály, jako jsou např. chalcinogenní skla, jsou použity pro delší vlnovou délku. Stejně jako ostatní skla, i tato skla mají index lomu asi 1,5.

Plastová optická vlákna (POF) jsou běžně vyráběna s jádrem o průměru 0,5 mm nebo větším. POF mají obvykle vyšší útlum, než skleněná vlákna (1 dB/m nebo vyšší). Tento vysoký útlum omezuje rozsah použití optických systémů, založených na POF. [1]



Obr. 1 Druhy optických vláken [1]



Obr. 2 Svazek optických vláken[1]

4.1 Jednovidové optické vlákno

Jednovidová vlákna (zkratka SM, anglicky single mode) vykazují nejlepší parametry optické přenosové cesty. Mají nejmenší průměr jádra, cca do 10 mikrometrů. Takto malé jádro má za následek velký úhel odrazu ve vlákně, což vede k menšímu prodloužení dráhy paprsku. Nemůže být použito u geometrických optik. Místo toho musí být analyzováno jako elektromagnetická struktura (podle rozhodnutí Maxwellovy rovnice = elektromagnetická vlnová rovnice). Elektromagnetické analýzy mohou být také vyžadovány k porozumění chování, například když se vyskytne tečka při koherentním světle šířeném v mnohovidovém vláknu. Jako optický vlnovod vlákno podporuje jeden nebo více omezených příčných vidů, které se šíří vláknem. Vlákno podporující pouze jeden vid je nazýváno single-mode (jednovidový režim kmitů), vlákno podporující více vidů se nazývá multi-mode (vícevidový režim kmitů).

Analýza vlnovodů ukazuje, že světelná energie ve vlákně není úplně upevněná v jádře. Místo toho, hlavně u jednovidového vlákna, je výrazný podíl energie v obalu okolo jádra (je to například i u tlumených vln).

Nejběžnější typ jednovidových vláken má průměr jádra 8–10 mikrometrů a je navrhován hlavně pro užití v průmyslu, kde se používá infračervené světlo. Vidová struktura závisí na vlnové délce použitého světla. Pro srovnání – mnohovidové vlákno se vyrábí s průměrem jádra asi 50 mikrometrů až stovky mikrometrů. Normalizovaný kmitočet pro toto vlákno by měl být menší než nula Bessels function=Jnula (přibližně 2,405). [6]

4.1.1 Vlastnosti jednovidového vlákna

- Mají velký význam v páteřních sítích, kde jsou použita pro přenos signálu a pro nasazení systémů s vlnovým multiplexem DWDM
- Vykazují nejlepší parametry optické přenosové cesty
- Používají se především v telekomunikacích, kde díky svým vlastnostem odstraňují vidové disperze
- Vedou pouze jeden jediný paprsek
- Nejčastěji se řídí standardizovaným doporučením ITU-T G.652
- Nevyskytuje se u nich vidová disperze, pouze chromatická a polarizační vidová disperze
- V jednovidovém vlákně se mohou vyskytnout dvě různé polarizace vidu, a to vede k polarizační vidové disperzi (PMD - Polarisation Mode Dispersion) – vyvolává mezisymbolovou interferenci a je těžce odstranitelná
- Lze dosáhnout nejvyšších přenosových rychlostí (až Gbit/s) na vzdálenosti do 1 km
- Pro své buzení vyžadují laserové diody

- Vyrábí se z homogenní skloviny

4.2 Vícevidové optické vlákno

Zkratka **MM** (anglicky **multimode**) je v informatice typ optického vlákna, který je v počítačových sítích nejčastěji používán pro komunikaci na krátké vzdálenosti, jako například uvnitř budovy nebo areálu. Rychlost přenosu u vícevidových linek se pohybuje okolo 10 Mbit/s až 10 Gbit/s na vzdálenosti do 600 metrů, což je více než dostačující pro většinu LAN sítí. Ve vícevidovém vláknu se skokovým profilem indexu lomu jsou paprsky světla vedeny podél jádra pomocí totální reflexe. Mezní úhel (minimální úhel pro totální odraz) je určený rozdílem indexu lomu jádra a pláště. Numerická apertura optického systému je bezrozměrné číslo, které je charakterizováno úhlem θ, pod kterým může systém přijímat nebo vysílat světlo. Numerická apertura (NA) je vyjádřena matematickým zápisem viz. vzorec (7) kapitola numerická apertura. [7]

4.2.1 Vlákno se skokovým indexem lomu

- SI – step index (skokový index lomu)
- Do vlákna vstupují vidy (paprsky) pod mnoha úhly, šíří se totálním odrazem, vytváří vícevidový způsob šíření signálu
- Používá se na krátké vzdálenosti
- Nevýhoda: vidová disperze = rozptyl, což omezuje šířku přenášeného pásma

4.2.2 Vlákno gradientní

U gradientních vláken (anglicky *graded-index*) se index lomu zvyšuje se vzdáleností od středu vlákna. Paprsek opisuje sinusovou křivku, což snižuje vidovou disperzi.

- GI – gradientní index (plynulá změna indexu lomu)
- Vlákno je tvořeno z tisíce tenkých vrstev, které se liší indexem lomu. Čím je paprsek dál od osy jádra, tím je index lomu menší, až paprsek přejde do kolmice a nakonec se vrátí k ose jádra
- Výhoda: eliminace vidové disperze = menší zkreslení, jednotlivé vidy dojdou na konec vlákna zhruba ve stejném časovém okamžiku
- Velmi často používané v datových aplikacích

4.2.3 Typy vícevidových vláken

Vícevidová optická vlákna jsou popisována podle velikosti jádra a průměru pláště. Vícevidové optické vlákno s označením 62,5/125 má velikost jádra 62,5 µm a průměr pláště 125 µm. Navíc jsou vícevidová vlákna popisována pomocí systému, určeného standardem ISO 11801 – OM1, OM2, a OM3, který je založen na šířce pásma vícevidového optického vlákna.

Po mnoho let se hodně používala 62,5/125 µm (OM1) a tradiční 50/125 µm (OM2) vícevidová optická vlákna. Tato vlákna mohou být využívána od Ethernetu (10 Mbit/s) do Gigabit Ethernetu (1Gbit/s) a díky svému relativně velkému jádru jsou ideální pro využití LED diodových vysílačů. Nověji se často používají vícevidová optická vlákna 50/125 µm (OM3), optimalizovaná pro laser. Takto označená vlákna poskytují dostatečnou šířku pásma pro 10 Gigabit Ethernet do vzdálenosti 300 metrů. Výrobci optických vláken zdokonalili výrobní proces od doby vydání standardu a kabely mohou být vyráběny s podporou 10 Gb Ethernetu do vzdálenosti až 550 metrů. Vícevidové optické vlákno optimalizované pro laser (LOMMF) je navrženo pro použití s 850 nm VCSEL lasery.

Přechod na LOMMF/OM3 nastal v okamžiku, kdy uživatelé začali přecházet na sítě s vyšší rychlostí. LED diody mají maximální modulační rychlost 622 Mbit/s, protože se nemohou zapínat a vypínat dostatečně rychle na to, aby mohly být nasazeny v širokopásmových aplikacích. Naopak VCSEL lasery jsou schopné dosáhnout modulační rychlosti převyšující 10 Gbit/s, a proto jsou používány v mnoha vysokorychlostních sítích. [7]

5 LUMINISCENČNÍ DIODY (LED)

5.1 Historie

Díky objevu elektroluminiscence Henryho Josepha Rounda (r.1907) se podařilo vědci Nicku Holonyakovi vyrobit v roce 1962 první funkční LED diodu. Tyto první svítivé diody však měly velmi nízký výkon na další využití jako zdroj světla. Až do roku 1971 bylo jejich využívání v elektrotechnice omezeno tím, že vyzařovaly pouze červené světlo. Od uvedeného roku byly LED diody vyráběny se schopností emitovat nové barvy (zelená, oranžová a žlutá), které zajistily daleko širší využití těchto zdrojů světla hlavně v oblasti signalizace. Avšak LED diody byly pořád příliš drahé ve srovnání s žárovkovými kontrolkami a proto byly používány spíše v drahých zařízeních.

V letech osmdesátých nastává velký rozmach LED technologií, vyrábí se svítivé diody různých tvarů, barev a také se začínají vyrábět LED displeje pro různé přístroje. V tomto období byla také zahájena výroba prvních LED žárovek s paticemi E27 a E14, ale z důvodu malých výkonů slouží převážně jako dekorativní světla. Také v Čechách začíná první výroba svítivých diod v podniku Tesla Rožnov. Diody však měly svítivost pouhých 0,8mCd a navíc byly velice drahé (cca 60,- Kč).

Díky velice nízké svítivosti a malému vyzařovacímu úhlu bylo využití LED pro běžné osvětlení silně omezeno, ovšem největší komplikací byla neschopnost tehdejších luminiscenčních diod emitovat bílé světlo. Tento stav trval až do roku 1993, kdy byly vyrobeny první vysocesvítivé modré LED diody, což následně vedlo k vývoji bílých LED (r.1995) pomocí skládání světelného spektra nebo za pomoci luminoforu. Tyto bílé svítivé diody otevřely cestu k vytvoření prvních LED žárovek, které už byly schopné konkurovat klasickým vláknovým žárovkám.

5.2 Princip funkce

LED je elektronický polovodičový prvek, jenž propouští proud pouze jedním směrem a při průchodu elektrického proudu součástkou vzniká elektroluminiscence (dioda emituje nekoherentní světlo s úzkým spektrem). Pásmo spektra záření je dáno chemickým složením polovodiče. Není možné emulovat přímo bílé světlo a tak se k vytvoření bílého světla využívá luminoforu (fluorescenčního materiálu), jenž transformuje modré světlo na žluté a díky míšení barev vzniká bílá. Popřípadě jiné typy vyzařují ultrafialové záření, které mění luminofor přímo na bílé světlo. Nejstarší bíle svítící LED obsahují trojici čipů, které skládáním tří základních barev (RGB - červená, zelená a modrá), vytváří bílé světlo.

Čím je vlnová délka emitovaného světla menší, tím roste velikost potřebného el. proudu a tedy pracovního napětí. Např. křemíkové diody mají toto napětí 0,6V, zelená LED z GaP 1,7V a modrá z SiC už 2,5V.

5.3 Provedení

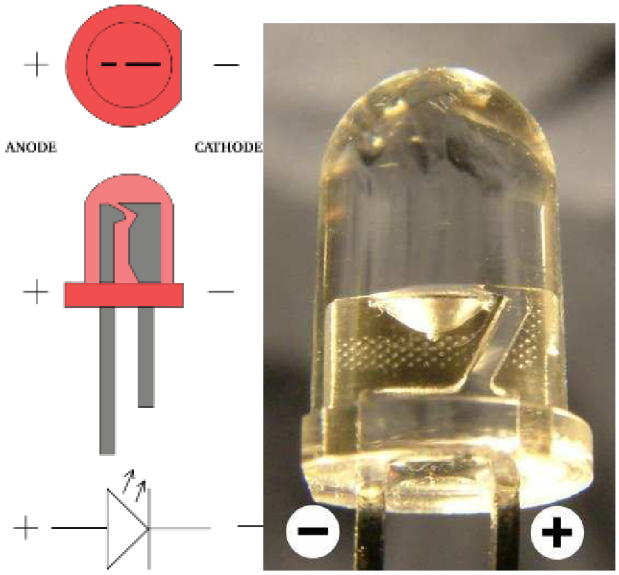
LED diody se používají jako indikátory, optické vysílače, panely a poslední době také v zobrazovacích jednotkách a jako nový ekonomický způsob osvětlování. Z čehož vyplývá, že LED diody se vyrábí v různých provedeních a tvarech.

Základem je monokrystal překrytý vrchlíkem z epoxidové pryskyřice nebo akrylového polyesteru. Důvod překrývání je ten, že materiál, ze kterého se LED vyrábí má vysoký index lomu a velká část světla by se na rozhraní se vzduchem odrazila totálním odrazem zpět.

Luminiscenční diody se vyrábí ve dvou hlavních provedeních, a to jako rozptylné nebo bodové.

5.3.1 Základní LED diody

Svítivé diody rozlišujeme podle různých parametrů. Specifikujeme u nich tvar pouzdra (oválný, obdélníkový), průměr nebo rozměry (3-4,8-5-8mm), dále pak barvu, výkon, vyzařovací úhel a svítivost. Všeobecně je dnes technologie výroby LED diod tak vyspělá, že se můžou objevit svítivé diody téměř jakéhokoli tvaru a provedení.



Obr. 3 Ukázka náčrtu a pouzdra LED - 5mm [12]

5.3.1.1 Charakteristické hodnoty napětí v propustném směru

Zde uváděné hodnoty platí pro základní LED diody 3mm nebo 5mm pro hodnotu proudu přibližně 20mA.

	Barva	vlnová délka (nm)	Napětí (V)	Látka
	Infračervená	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	GaAs
				AlGaAs
	Červená	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	AlGaAs
				GaAsP
				AlGaInP
				GaP
	Oranžová	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	GaAsP
				AlGaInP
				GaP
	Žlutá	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	GaAsP
				AlGaInP
				GaP
	Zelená	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	InGaN/GaN
				GaP
				AlGaInP
				AlGaP
	Modrá	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	ZnSe
				InGaN
				SiC
				Si
	Fialová	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	InGaN
				Červená/modrá + fialový luminofor
	Ultrafialová	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamant (Vlnová délka: 235 nm)
				Nitrát Borný (Vlnová délka: 215 nm)
				AlN (Vlnová délka: 210 nm)
				AlGaN
				AlGaInN - (Vlnová délka: pod 210 nm)
	Bílá	Celé spektrum	$\Delta V = 3.5$	Modrá/ultrafialová + žlutý luminofor

Tab. 1 Hodnoty úbytků napětí na LED diodách při 20mA[12]

V poslední době jsou také hodně využívány vícebarevné LED diody, jenž navenek vypadají jako klasické svítivé diody, avšak liší se například počtem vývodů nebo možností připojení (změnou polarity se mění barva). Barevného efektu u více-vývodových LED diod se dosahuje míšením barev, což umožní vytvořit téměř jakoukoli barvu. Další možností, jak vytvořit pomocí jedné svítivé diody více barev, je připojení různých napětí (se zvyšující se napájecím napětím se mění barva vyzařovaného světla).

5.3.2 Segmentové displeje

Jsou to zobrazovací jednotky skládající se nejčastěji ze sedmi LED diod, které mají společnou anodu nebo katodu. Jsou vedle sebe poskládány tak, že tvoří obrazec nebo zobrazovací jednotku, u níž zapnutím určitých diod dosáhneme žádaného tvaru či čísla.

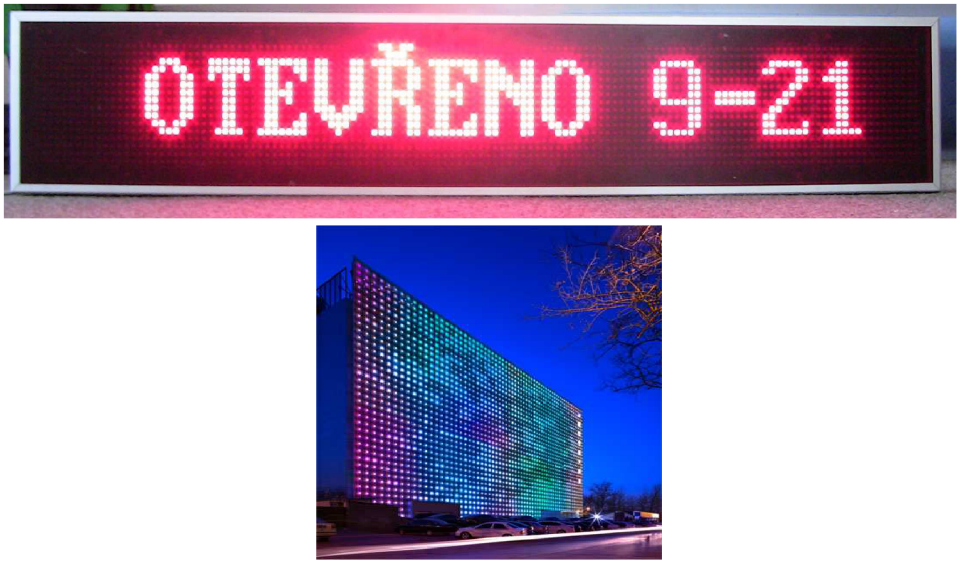
Pokud máme více-segmentové zobrazovače, můžeme dosáhnout i písmen a diakritických značek.

Obr. 4 Ukázka různých segmentových displejů

5.3.3 LED displeje a panely

Jsou to zobrazovací jednotky různých tvarů a provedení. Nejčastěji jde o LED diody uspořádané do sítě, kde se zobrazovaného efektu dosáhne spínáním jednotlivých diod. Tyto displeje začínaly nejdříve jako jednobarevné zobrazovače nejčastěji s jedním stacionárním obrazcem. Postupným vývojem se dosáhlo posouvání obrazce nebo textu až k vícebarevným LED, které otevřely cestu pro barevnou velkoformátovou projekci (světelné billboardy). Tyto zobrazovací jednotky mají určitě svou roli i v dekoraci, kde některé moderní budovy mají ve stěnách zabudované LED moduly, jenž umožňují téměř neomezené zobrazení barev a tvarů.

V posledních pár letech vedla miniaturizace výroby luminiscenčních diod k možnosti vytvoření LED televizorů a monitorů, které v současnosti prožívají největší rozmach a jejich vývoj určitě ještě poroste.



Obr. 5 Ukázka LED panelu a LED dekorace na budově

5.3.4 LED osvětlení

Jak už bylo zmíněno výše, opravdový rozvoj LED osvětlení začal až po dosažení bílého světla r.1995. Od této chvíle byly LED diody považovány za součástky, které mohou mnohem ekonomičtějším provozem plně nahradit klasické žárovky.

Stejně jako u základních luminiscenčních diod se i tyto LED osvětlovací moduly vyrábějí v různých provedeních dle jejich účelu. Jejich nesporná výhoda oproti klasickému osvětlení je ta, že jsou velice úsporným zdrojem světla a jejich životnost je několikanásobně větší. Jedna z dalších výhod je výběr barevného spektra, jenž LED osvětlení nabízí a také jeho malé rozměry oproti jiným zdrojům světla.

Výraznější používání LED žárovek v současnosti omezuje jejich vyšší cena oproti jiným úsporným druhům žárovek, avšak i přesto se jejich užití vyplatí v místech, kde se dlouho svítí.

LED žárovky se vyrábějí jak se základním typem patic, tak i s nestandardními typy upevnění, jenž dovolují jejich využití téměř kdekoliv.

Obr. 6 LED žárovky s paticí E27 (vlevo) a MR16 (vpravo)

Obr. 7 LED halogen

6 NUMERICKÁ APERTURA

V optice je Numerická Apertura (NA) definována jako bezrozměrné číslo, které charakterizuje rozsah úhlu, pod kterým může systém ještě přijímat nebo vyzařovat světlo. Přesná definice se liší podle oblasti optiky.

U optických vláken jde o jejich důležitou charakteristiku. Jedná se o maximální úhel, pod kterým mohou světelné paprsky do optického vlákna dopadat tak, aby jím mohly procházet. Index lomu jádra optického vlákna n_1 musí být větší než index lomu pláště n_2, aby docházelo k odrazu a následnému šíření paprsku optickým vláknem.

Obr. 8 Přenos paprsku v ideálním optickém vlákně

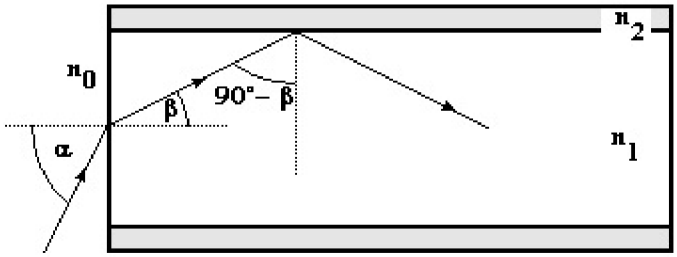
Světelný paprsek dopadající na vlákno pod úhlem α (úhel mezi dopadajícím paprskem a osou procházející středem vlákna) se láme do vlákna pod úhlem β. Přechod paprsku z vnějšího prostředí do vlákna je popsán *Smellovým zákonem lomu*

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_1}{n_0}. \qquad (1)$$

Poté na plášť vlákna dopadá paprsek pod úhlem $90° - \beta.$ Úhly dopadů a odrazů ve vláknu tvoří pravoúhlý trojúhelník, pro který platí:

$$\beta + (90° - \beta) + 90° = 180° \qquad (2)$$

Což je vidět na Obr.9.



Obr. 9 Pohyb paprsku vláknem [13]

$\alpha[^\circ]$ -úhel, pod kterým dopadá paprsek na čelo optického vlákna
$\beta[^\circ]$ -úhel, pod kterým se paprsek lomí materiálem jádra
n_0[-] -index lomu vzduchu (materiálu ze kterého paprsek vstupuje do jádra)
n_1[-] -index lomu materiálu jádra optického vlákna
n_2[-] -index lomu materiálu pláště optického vlákna

Na plášti musí dojít k úplnému odrazu tak, aby se světlo mohlo šířit dál bez velkých ztrát vláknem. Proto můžeme tento úhel brát jako mezní úhel dopadu a můžeme ho zapsat:

$$\sin(90° - \beta) = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \cos\beta = \frac{n_2}{n_1} \qquad [-] \qquad (3)$$

toto se dá podle goniometrických pravidel psát i takto:

$$\sqrt{1-\sin^2\beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin\beta = \sqrt{1-\left(\frac{n_2}{n}\right)^2} = \frac{1}{n_2}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad [-] \qquad (4)$$

Správně by se mělo psát:

$$|\sin\beta| = \frac{1}{n_2}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad [-], \qquad (5)$$

ale protože nás zajímají pouze hodnoty úhlů v intervalu $\langle 0;90° \rangle$ nemusíme absolutní hodnotu psát, protože v tomto intervalu jsou hodnoty *sin* i *cos* nezáporné.
Po dosazení do *Snellova zákona lomu* dostaneme:

$$\frac{\sin\alpha}{\frac{1}{n_2}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{n_1}{n_0} \Rightarrow \sin\alpha = \frac{1}{n_0}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad [-] \qquad (6)$$

Tento vztah platí pro maximální úhel, pod kterým mohou paprsky do optického vlákna dopadat. Což znamená, že α je maximální úhel, pod kterým mohou paprsky do optického jádra vstupovat tak, aby se paprsek vláknem šířil a nezanikl. [13]

Vztah pro NA je potom:

$$NA = n_0 \sin\alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad [-] \qquad (7)$$

6.1 Hodnoty NA pro jednotlivé typy vláken

V katalogu na stránkách společnosti ***Interlink*** (viz. seznam lit. [10]) jsem narazil na hodnoty NA různých druhů kabelů. Firma udává hodnoty NA pro různá vlákna takto:

Optical Transmission Performanc	Singlemode (1310/1550 nm)	Multimode (850/1300nm)	
	9/125 (µm)	50/125 (µm)	62.5/125 (µm)
Maximum Attenuation (dB/km)	0,35 / 0,22	2,5 / 0,7	2,7 / 0,6
Minimum Bandwidth (MHz.km)	N/A	500 / 500	200 / 600
Numerical Aparture	0,12 ± 0,01	0,200 ± 0,015	0,275 ± 0,015

Tab. 2 Parametry určitých typů vláken[10]

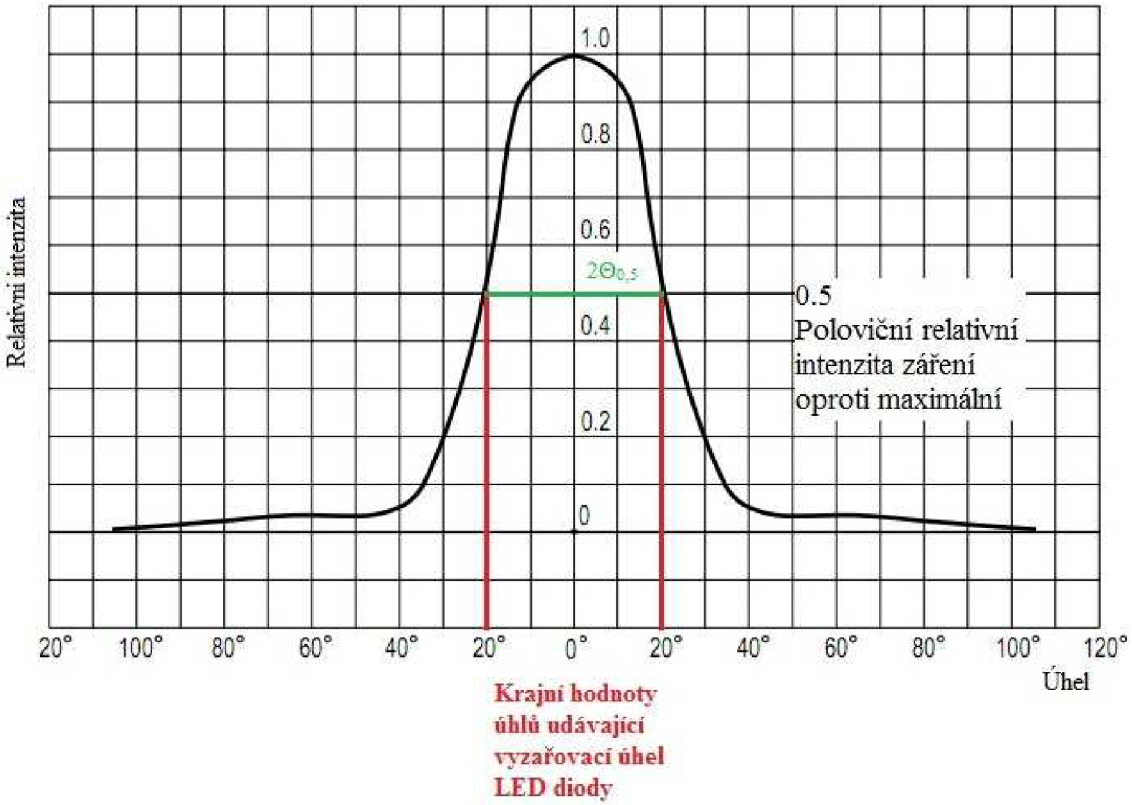
Samozřejmě každý výrobce dosahuje jiných parametrů, ale pokud jde o NA u těchto typů vláken, tak ta se liší řádově o setiny. Bohužel se mi nepodařilo najít přesné rozsahy NA pro jednotlivé typy vláken a proto berte tuto tabulku spíše jako orientační.

Hodnoty a matematické postupy jsem chtěl ověřit s českou normou ČSN EN 60793-1-43 *Optická vlákna:Měřící a zkušební postupy-Numerická apertura*. Avšak tato norma je převzatá k užití z evropské normy a v češtině je vydána k nahlédnutí pouze obálka. Jediná možnost, kde lze nahlédnout do celého dokumentu je v ústředí ČNI, který se nachází v Praze. Protože jsem se však v daném období činnosti na této bakalářské práci do Prahy nedostal, nemohu konstatovat, že dané výpočty a měřicí postupy jsou v souladu s touto normou. Ale vzhledem k tomu, že jsem čerpal z více různých zdrojů domnívám se, že tyto zdroje z normy vychází.

7 VYZAŘOVACÍ ÚHEL LED DIODY

Dle české normy ČSN EN 12 0001, která přejímá evropskou normu přímo k užití, odpovídá vyzařovací úhel $2\Theta_{0,5}$ úhlu mezi směry, ve kterých optická intenzita klesá na polovinu oproti maximální hodnotě. K jednoduchému odečítání hodnot z grafu nám pomůže relativní intenzita, kterou získáme tak, že každou z naměřených optických intenzit podělíme maximální naměřenou hodnotou. Hodnoty tedy budou spadat do intervalu <0;1> , což velice usnadní orientaci v grafu.

Princip odečtu vyzařovacího úhlu z naměřených hodnot zobrazených v grafu znázorňuje Obr.10.



Obr. 10 Princip měření vyzařovacího úhlu LED diody

V principu je měření totožné s měřením NA pomocí vyzařovací charakteristiky. Liší se pouze v práci s naměřenými údaji a zpracováním grafů. To je také důvod, proč se k měření vyzařovacích charakteristik a úhlů LED diod využívají stejné měřicí systémy, jako u měření NA. Proto, když je k dispozici systém navržený na měření NA, který není rozšířen o možnost měřit LED diody, je dobré jej modifikovat a tím zvětšit jeho měřicí schopnosti na širší pásmo optických prků (součástek).

Zástupcem takového systému je měřicí systém SOMS, navržený především k měření NA. Jeho modifikací dosáhneme rozšíření možností měření, což je také cílem této bakalářské práce.

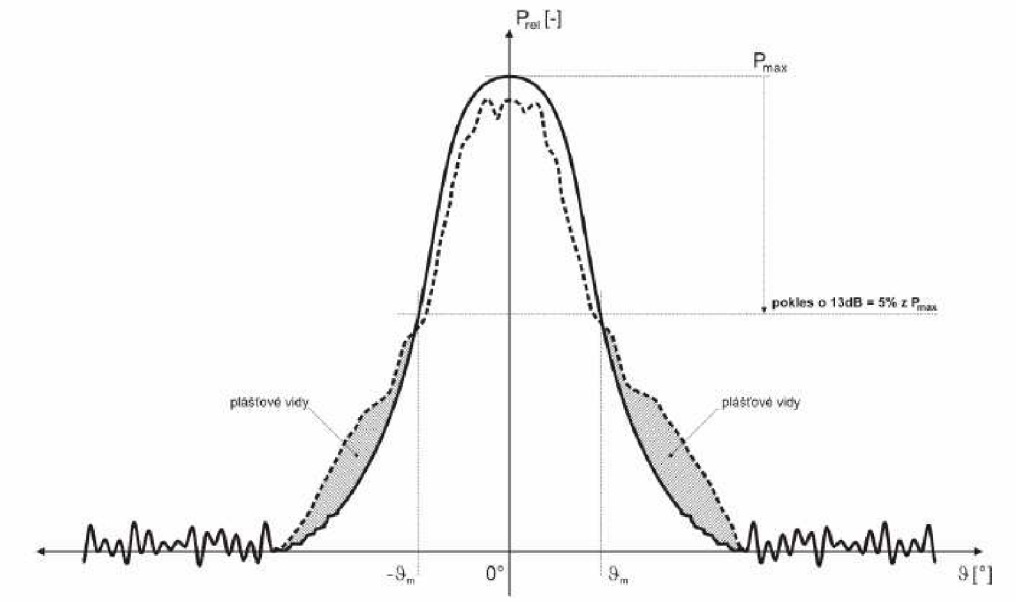
8 MĚŘENÍ NUMERICKÉ APERTURY

Způsoby měření NA se liší v závislosti na optickém systému, který měříme. Existují různé druhy měřicích systémů a přístrojů od jednoduchých, řízených manuálně, přes poloautomatické, kde se některé parametry musí nastavovat a zbytek již provede počítač, až po plně automatické, které jsou řízeny počítačem. Obsluha se pak stará pouze o příslušný program a provádí výměnu měřených optických systémů (např. optického vlákna nebo čočky).

Ve své práci se však budu zabývat výhradně měřením NA u optických vláken. Toto měření se provádí pomocí mnoha měřicích systémů, jichž je celá řada od různých výrobců. Jednou z nejčastěji používaných metod měření NA je analýza pomocí vyzařovací charakteristiky na výstupu rovnoměrně buzeného optického vlákna. Je to proto, že stanovení indexů lomu jádra a pláště vlákna je většinou velmi obtížné. Numerická apertura se z vyzařovací charakteristiky vypočítává tak, že se bere hodnota v 5% maximální intenzity vyzařovací charakteristiky (podle doporučení IEC a EIA), což je vidět na Obr.11. V poslední době se debatuje nad tím, jestli se má odečítat hodnota NA ze šířky vyzařovací charakteristiky v hodnotě v 5% max. intenzity, což odpovídá poklesu optického výkonu oproti maximu o 13dB a nebo spíše ze šířky v 10% max. intenzity, což je pokles optického výkonu vůči maximu o 10dB. Měření se musí provádět v tzv. *vzdálené oblasti*, tedy ve vzdálenosti o hodně větší, než je průměr optického vlákna které měříme. Pro tuto vzdálenost musí platit podmínka:

$$z \gg \frac{d^2}{\lambda} \quad [\mathrm{m}] \qquad (8)$$

d[m]-průměr vlákna
λ[m]-pracovní vlnová délka



Obr. 11 vyzařovací charakteristiky GI optického vlákna [9]

8.1 Princip měření numerické apertury

Princip je znázorněn na obrázku (Obr.12). Analyzované optické vlákno se měří tak, že se naváže pomocí redukce nebo spojky k optickému vysílači (OV), který může být realizován LED diodou nebo laserovým optickým zdrojem podle potřeby měření a druhu vlákna, které měříme. Konec vlákna je pevně uchycen do stojanu, jenž zajišťuje jeho stálé upevnění do nehybné polohy. K tomuto stojanu je také připevněn optický přijímač (OP), který skenuje intenzitu dopadajícího záření v závislosti na velikosti úhlu ϑ vůči ose optického vlákna. Toto měření se následně zpracovává počítačem, který také provede výpočet NA a vykreslení intenzity dopadajícího světla na úhlu natočení.

Obr. 12 Princip měření NA

8.1 Kontinuální režim měření

V tomto režimu není optický vysílač modulován, což znamená, že je stále zapnut. Proto je zesilovač signálové cesty také trvale zapnut po celou dobu měření. Zesilovač pozadí je v tuto chvíli vypnutý. A proto v tomto režimu není eliminován vliv zbytkového světla a šumu předzesilovače, což znamená, že když měříme v tomto režimu, musíme mít měřicí systém světelně odstíněn.

8.1 Synchronní režim měření

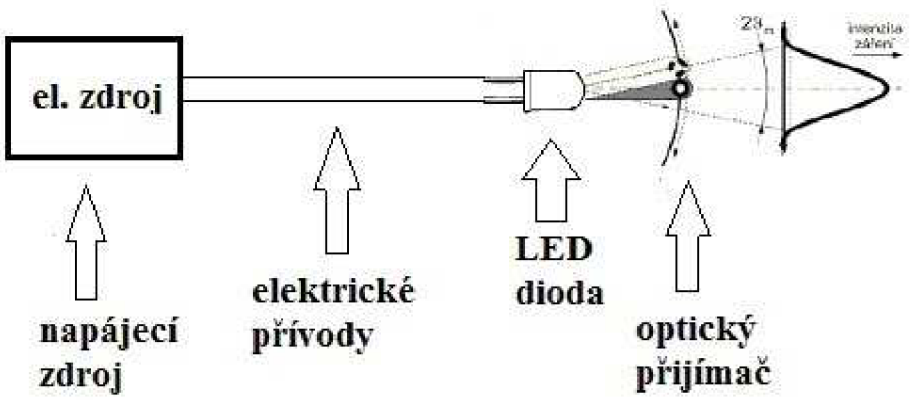
V tomto režimu je optický vysílač modulován, což vede k tomu, že signály jdoucí na zesilovače pozadí a signálové cesty jsou průměrovány integrátory s proměnou časovou konstantou (až 10s). Hodnoty napětí na výstupu zesilovačů jsou odečteny na diferenciálním vstupu A/D převodníku. Takto získáme přesnou hodnotu úrovně přenášeného signálu bez šumové složky a zbytkového světla i pro signál, který má o hodně nižší úroveň než šum (zhruba až 100x). Měřicí systém tak nemusíme světelně odstínit.

9 MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK LED DIOD

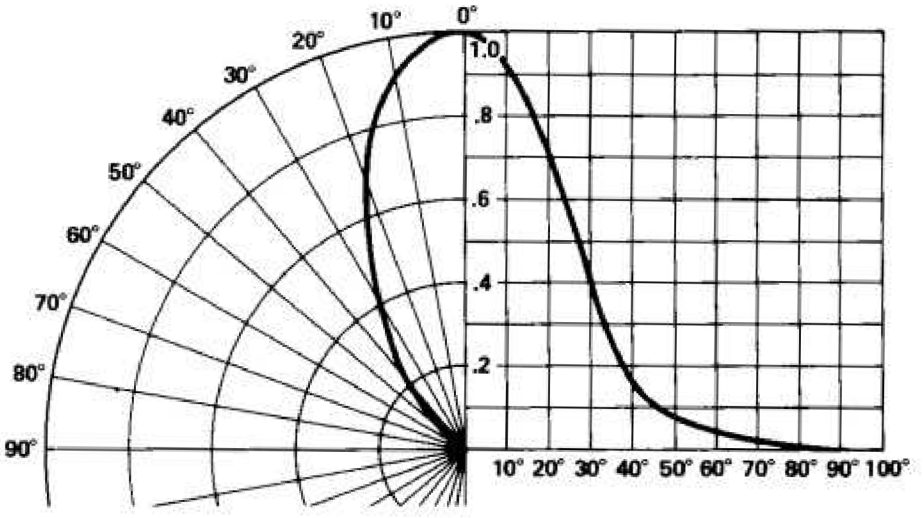
Postup při měření směrových charakteristik LED zdrojů je podobný, jako u měření NA. Liší se pouze ve zpracování výsledků a následném odečtu hodnot z vynesených grafů.

Postup je následující: Do držáku pro LED diodu vložíme měřenou luminiscenční diodu do takové polohy, aby byla přímo proti optickému snímači. Soustava by měla být světelně odstíněná tak, aby výsledek měření nebyl zkreslen. Po upevnění a odstínění se optický senzor pohybuje v rozsahu ±90° tak, aby pokryl pole v rozsahu 180°. Toto je nejčastěji prováděno automaticky po kroku, který předem nastavíme. U měřicího systému SOMS jsou výsledky po ukončení měření exportovány do tabulkového dokumentu v EXCELu, kde je můžeme dále zpracovávat.

Musíme rozlišit, zda chceme měřit směrovou charakteristiku LED diody nebo zda chceme odečítat vyzařovaný úhel. Pro určení směrové charakteristiky musíme naměřené hodnoty vynést do kruhového grafu, zatím co pro zjištění vyzařovacího úhlu nám postačí graf XY, ze kterého následně odečteme úhel pro daný pokles vůči maximální intenzitě.



Obr. 13 Princip měření LED diod



Obr. 14 Ukázka zpracování a vynesení hodnot po proměření LED diody

10 MĚŘICÍ SYSTÉM SOMS UMOŽŇUJÍCÍ MĚŘIT NUMERICKOU APERTURU A PARAMETRY LED

Tento systém je určen pro měření NA a vyzařovacích charakteristik optických vláken. Jejím výrobcem je společnost Safibra s.r.o. a obsahuje software s názvem SYNC 2.0. Tento měřicí systém jsem využil k naměření NA různých vláken, které v této práci dále zpracovávám.

10.1 Popis měřicího systému

Měřicí systém SOMS se skládá ze:

- Základní jednotky
- Externích modulů zdroje záření a fotodetektoru s předzesilovačem, které jsou k základní jednotce připojeny pomocí plochých kabelů
- Základní jednotka je ovládaná z PC pomocí rozhraní RS232
- Sestava je doplněna o externí modul úhlového nastavování polohy fotodetektoru kolem upevněného konce optického vlákna ve vodorovné rovině

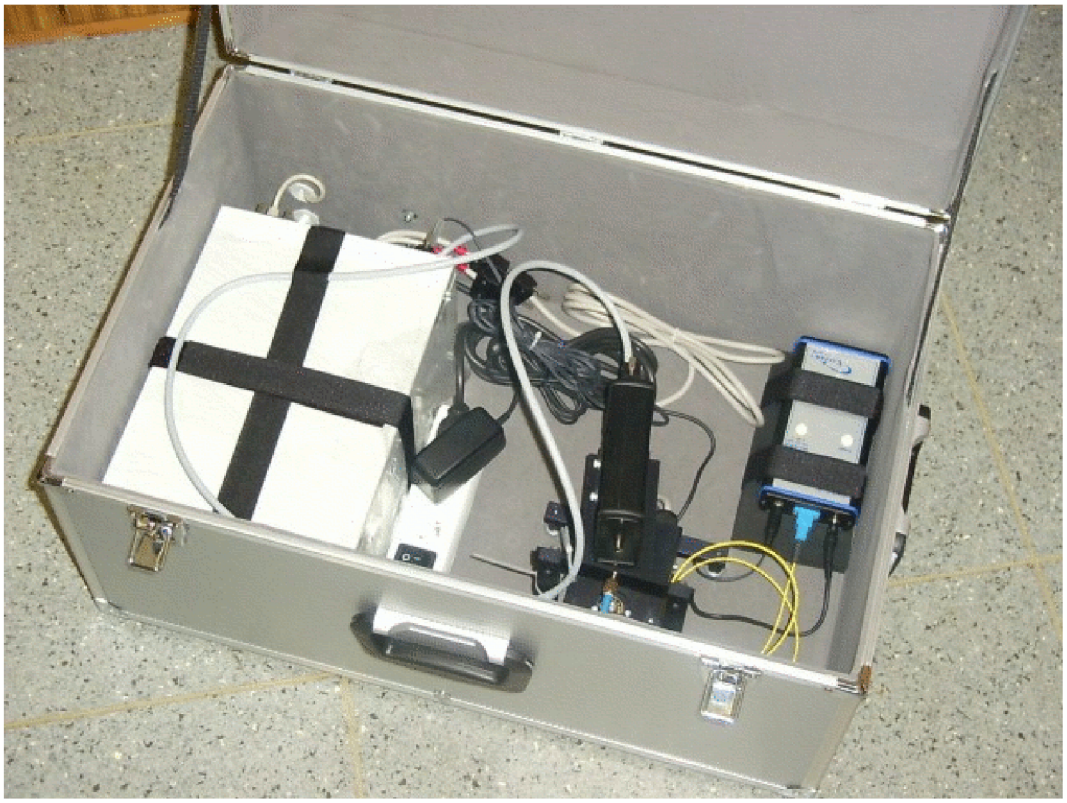
Modul zahrnuje optická polohová čidla a jeden krokový motor, který určuje úhlovou polohu modulu fotodetektoru vestavěného na otočném rameni. Moduly jsou programově ovládány ze základní jednotky a PC. Program pro řízení, zpracovávání a zobrazení naměřených dat je kompatibilní s operačními systémy Windows a Linux.

Pomocí tohoto modulu lze systém využívat i pro měření numerické apertury optických vláken a po doplnění o vhodný zdroj záření s rovnoběžným výstupním svazkem i pro měření parametrů optických vláken a senzorů v závislosti na vidovém buzení.

Systém pracuje na základě synchronní detekce měřeného signálu, čímž se značně omezují rušivé vlivy okolního prostředí.

Zdroj záření může být libovolný, obvykle LD nebo LED s externí modulací (pro synchronní režim). Vhodným a odzkoušeným zdrojem je i **OFLS-5**.

Systém může pracovat v ***kontinuálním*** nebo ***synchronním*** režimu. Synchronní detekce eliminuje vliv rušivých vlivů, které mohou ovlivnit výsledek měření. Použitá vlnová délka zdroje a detektoru záření je volitelná v závislosti na individuálních požadavcích.



Obr. 15 Měřicí systém SOMS

11 TVORBA A NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO UCHYCENÍ LED DIOD

Při tvorbě přípravku jsem vycházel ze svých poznatků a znalostí systému SOMS, které jsem nabyl při měření NA optických vláken na tomto systému. Jako předlohu jsem bral originální systém pro uchycení optických vláken a svůj návrh jsem tvořil tak, aby bez větších zásahů do mechanických částí měřicího systému bylo možné volit mezi měřením NA a vyzařovacím úhlem LED diod.

Hlavním požadavkem k vytvoření držáku na LED diody byla schopnost kalibrace tak, aby luminiscenční dioda a optický snímač byly v jedné ose. Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by ke zkreslení výsledků vlivem posunutí vyzařovací charakteristiky oproti optickému snímači. To by vedlo k posunu měřených hodnot vůči skutečným. Dalším bodem, který jsem musel dodržet, byla možnost uchycení různých diod o průměru 3mm, 5mm a 8mm do přípravku tak, aby se držák nemusel demontovat pro každou novou LED diodu o jiném průměru.

Z těchto důvodů jsem vytvořil dva návrhy, jež splňovaly uvedené podmínky a to tím způsobem, že přípravek bylo možné posouvat v jednom případě horizontálně a v druhém vertikálně. To mi pak umožnilo jak kalibraci, tak i možnost volby různých LED diod o požadovaném průměru. Z těchto dvou návrhů jsem si nakonec pro realizaci zvolil ten přípravek, který umožňuje vertikální pohyb (viz. Obr.16).

11.1 Popis a ukázka přípravku

Přípravek je zhotoven z hliníkového proužku o tloušťce 5mm. Po stranách má vyfrézované otvory, umožňující vertikální pohyb v držáku měřicího systému SOMS. K uchycení LED diod slouží standardní objímky L-REFLEK pro 3mm, 5mm a 8mm průměry, které jsou však upraveny tak, aby z objímky vystupovala co největší možná část LED diody. Nedochází tak ke zkreslení měření samotným držákem svítivých diod.

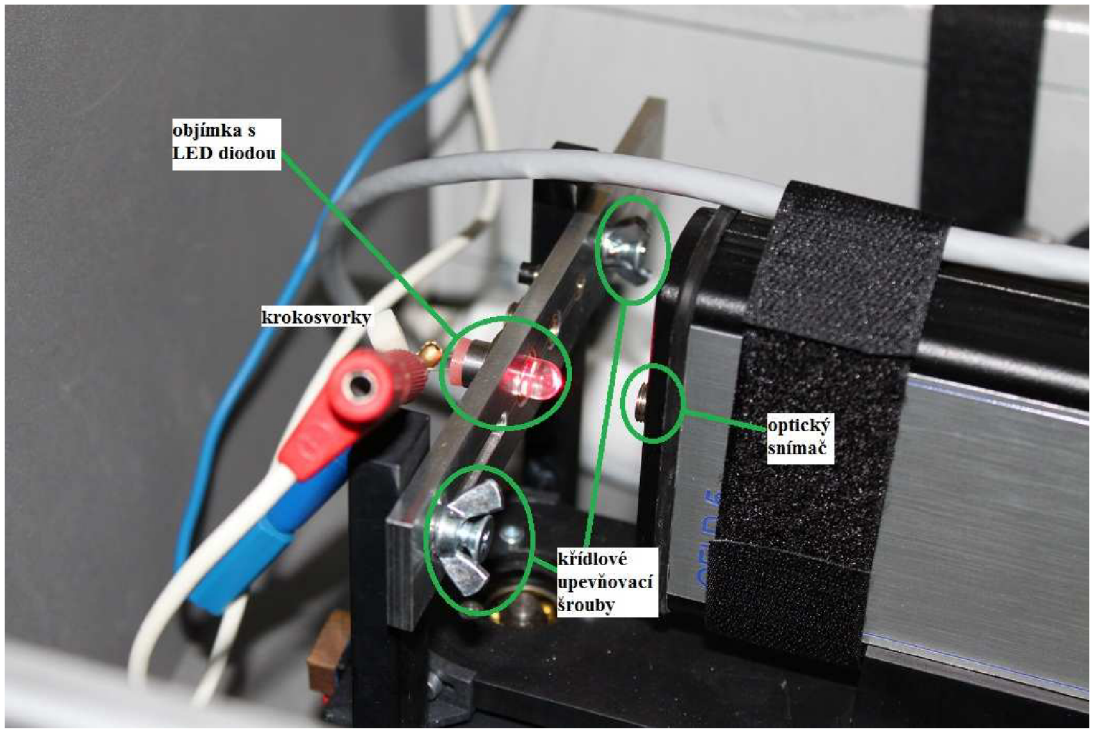
Bližší specifikace a dokumentaci k tomuto přípravku na upevnění tří typů LED diod přikládám v příloze této bakalářské práce na CD ve složce: *Dokumentace_přípravku_LED*.

Obr. 16 Ukázka předního, bočního a zadního náhledu na přípravek

11.2 Popis a ukázka uchycení přípravku v systému SOMS

Přípravek je uchycen pomocí dvou šroubů, stejně jako přípravek pro uchycení optického vlákna. Já jsem avšak použil křidélkové šrouby, protože šrouby s imbusovou hlavou neumožňují rychlou výměnu přípravků pro LED diody a pro optická vlákna. Tyto šrouby bych také doporučil pro budoucí práci na tomto přípravku z důvodu lepší manipulace a přesnějšího nastavení.

Jak už bylo řečeno, přípravek pro měření LED diod se upevňuje naprosto shodně s přípravkem pro měření optických vláken na držák v systému SOMS. Kalibrace a výměna měřených svítivých diod je zajištěna horizontálním posunem přípravku. K napájení LED diod jsem využíval elektrický zdroj a k připevnění vodičů k nožičkám diody jsem používal krokosvorky. Tento způsob připojování byl pro mé měření dostačující, avšak v případě častějšího používání doporučuji vytvořit jednoduchou napájecí patici. Dojde tak k usnadnění připojování napájecího zdroje a snížení mechanického namáhání nožiček LED diod.



Obr. 17 Ukázka upevnění přípravku na měření LED v měřicím systému SOMS

Na Obr. 17 je vidět uspořádání a uchycení navrženého přípravku na měření LED diod. Je zde také vidět upevněná svítivá dioda o průmětu 8mm, která je v ose s optickým snímačem, nastaveným na nulový úhel. Za předním upevňovacím šroubem je také vidět vyfrézovaný otvor, který umožňuje horizontální posun přípravku. Tento systém umožňuje nastavit do osy s optickým snímačem i LED diody o průměrech 3mm a 5mm.

12 VLASTNÍ MĚŘENÍ NUMERICKÉ APERURY POMOCÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU SOMS

Při měření jsem zjišťoval vyzařovací charakteristiku optického vlákna nejméně ve 20 bodech. Počet těchto bodů je důležitý pro určení poklesu intenzity o 13dB, což odpovídá maximálnímu úhlu, kdy ještě paprsek může být navázán do vlákna. Z naměřených hodnot se následně počítá NA. Každé vlákno jsem vždy měřil pro oba režimy, jak pro *kontinuální,* tak pro *synchronní.* V každém režimu jsem měřil s optickým stíněním a bez něj, abych analyzoval rozdíly mezi jednotlivými režimy a vliv světelného rušení.

Při studování materiálů z různých zdrojů jsem narazil na to, že při měření jednovidových a mnohavidových vláken se používá laserový zdroj. Naopak při měření gradientních mnohavidových vláken je doporučeno použít zdroj s LED diodou. Je to z důvodu vyzařování širšího svazku a vlákno pak má širší vyzařovací charakteristiku. Dalším doporučením bylo měřit gradientní vlákno jen v kontinuálním režimu.

12.1 Postup při měření numerické apertury (NA)

Při měření NA za pomocí měřicího systému SOMS nejdříve zapneme napájení samotného systému a zdroje záření a potom postupujeme následovně:

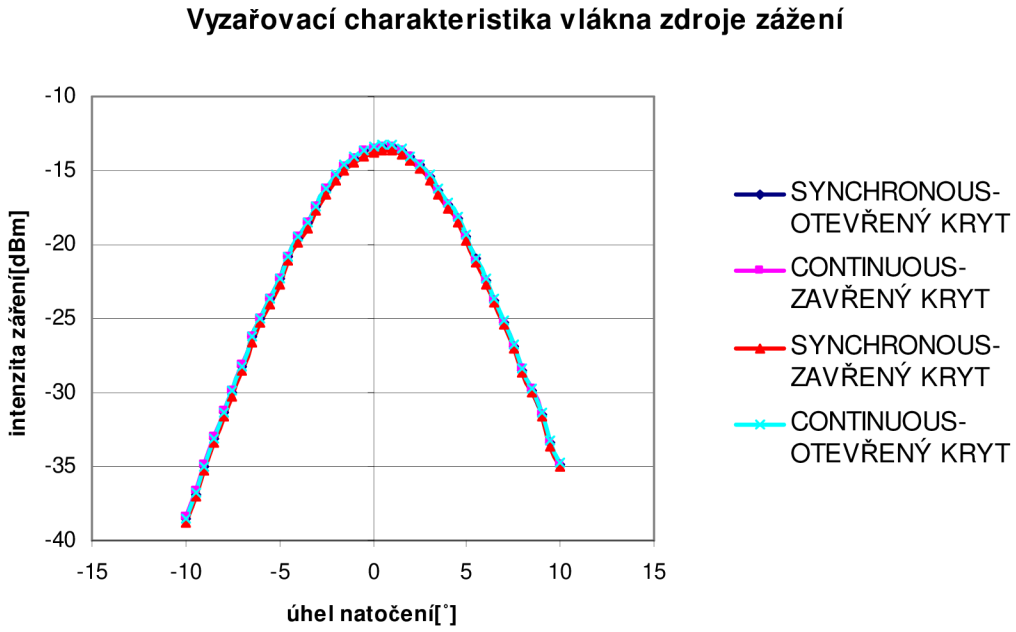
1. Připojíme ke zdroji záření měřené vlákno a druhý konec upevníme do stojanu .
2. Spustíme program Sync 2.0 (dokud nenaběhne status *Ready*).
3. Musíme spustit režim na měření Numerické Apertury, který se nachází v menu *Measure/Numerical Aperture.*
4. Dále se musí nastavit hodnoty počátečního úhlu, konečného úhlu, krok měření a název výstupního souboru s výsledky měření, což se nastaví v záložce *Parameters*. Počáteční a koncový úhel se musí volit větší než je mezní úhel, kdy je vlákno ještě schopno svazek do sebe navázat. Krok měření se volí podle počtu naměřených hodnot (nejméně 20 bodů to je krok 0,5˚, ale optimální je 40 bodů). Důvod je, že čím více hodnot dostaneme, tím budeme moci NA spočítat přesněji.
5. V záložce *Additional controls* se nastaví režim měření na *Synchronous* nebo *Continuous*.
6. Nastavíme *Automatic* v záložce *Ranger kontrol* pro nastavení automatického měření hodnot.
7. Pro zahájení měření se stiskne tlačítko *START* (po stisknutí tlačítka se automaticky nakalibruje fotodetektor).

8. Po ukončení měření se v záložce *Results* objeví naměřené údaje. A ve výstupním souboru jednotlivé hodnoty pro jednotlivé úhly (soubor pro program Microsoft Excel)[9].

V mém případě jsem měl k dispozici jen laserový zdroj, se kterým fungovalo měření pouze na *EXT MODE* a měření jsem prováděl vždy s otevřený i zavřeným krytem pro oba měřicí módy. Což vedlo u některých vláken k rozdílným hodnotám při jednotlivých měřeních viz. grafy níže.

12.2 Výsledky měření a grafy

12.2.1 Měření zdrojového vlákna záření



Obr. 18 Vyzařovací charakteristika vlákna zdroje záření

Výsledky NA pro jednotlivé režimy měření:

Režim *synchronous* otevřený kryt: NA=0,1210

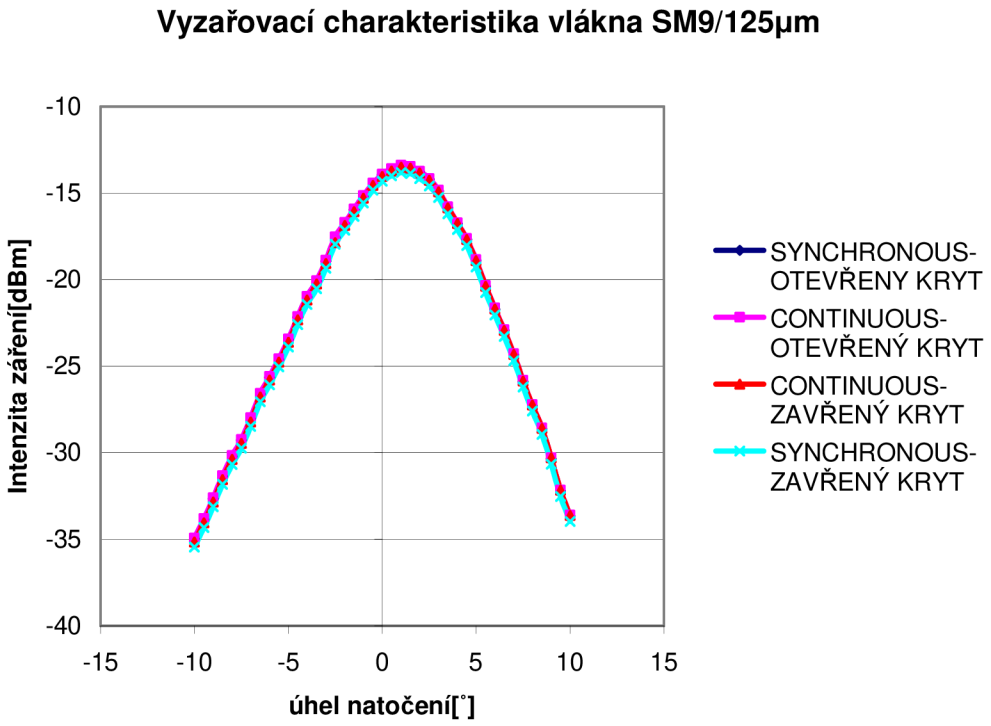
Režim *synchronous* zavřený kryt: NA=0,1211

Režim *continuous* otevřený kryt: NA=0,1210

Režim *continuous* zavřený kryt: NA=0,1210

Z naměřené charakteristiky je vidět, že průběhy pro jednotlivé režimy měření se příliš neliší, což je způsobeno tím, že vlákno zdroje je jednovidové. Přičemž zdroj záření byl přepnut na EXT MODE, ale přitom nebyl připojen do měřicího systému datově, z čehož vyplývá, že zdroj nepřijímal modulační signál a proto není rozdíl mezi měřením v synchronním a kontinuálním režimu. Na konci vlákna je konektor (FC).

12.2.2 Měření vlákna SM9/125µm



Obr. 19 Vyzařovací charakteristika vlákna SM9/125µm

Režim *synchronous* otevřený kryt: NA=0,1231

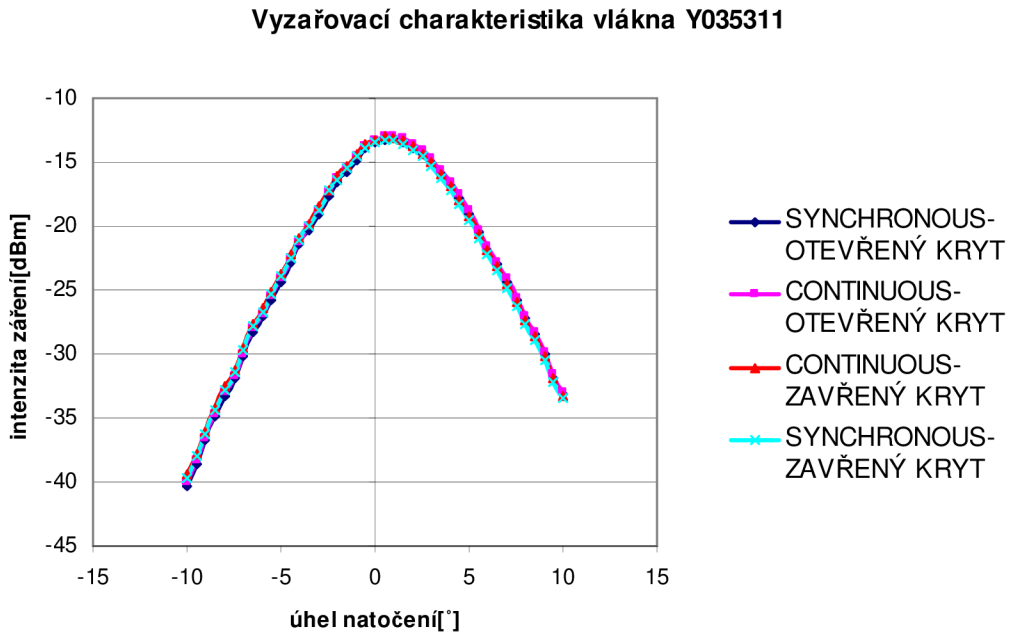
Režim *synchronous* zavřený kryt: NA=0,1229

Režim *continuous* otevřený kryt: NA=0,1231

Režim *continuous* zavřený kryt: NA=0,1230

V tomto měření bylo měřené vlákno připojeno k vláknu zdroje záření pomocí spojky (FC-FC). Měřené vlákno je jednovidové, a proto opět není rozdíl mezi měřeními v synchronním a kontinuálním režimu. Numerické Apertury pro jednotlivá měření se proto liší jen minimálně. Nevím přesně výrobce měřeného vlákna, ale na internetu jsem našel vlákno stejného typu, kde výrobce udával hodnotu NA=0,12±0,01 viz. Tab.2., což by odpovídalo a dokazovalo, že měření pro jednovidová vlákna jsou s tímto měřicím systémem a s nastavením zdroje záření správné.

12.2.3 Měření vlákna Y035311



Obr. 20 Vyzařovací charakteristika vlákna Y035311

Režim *synchronous* otevřený kryt: NA=0,1158

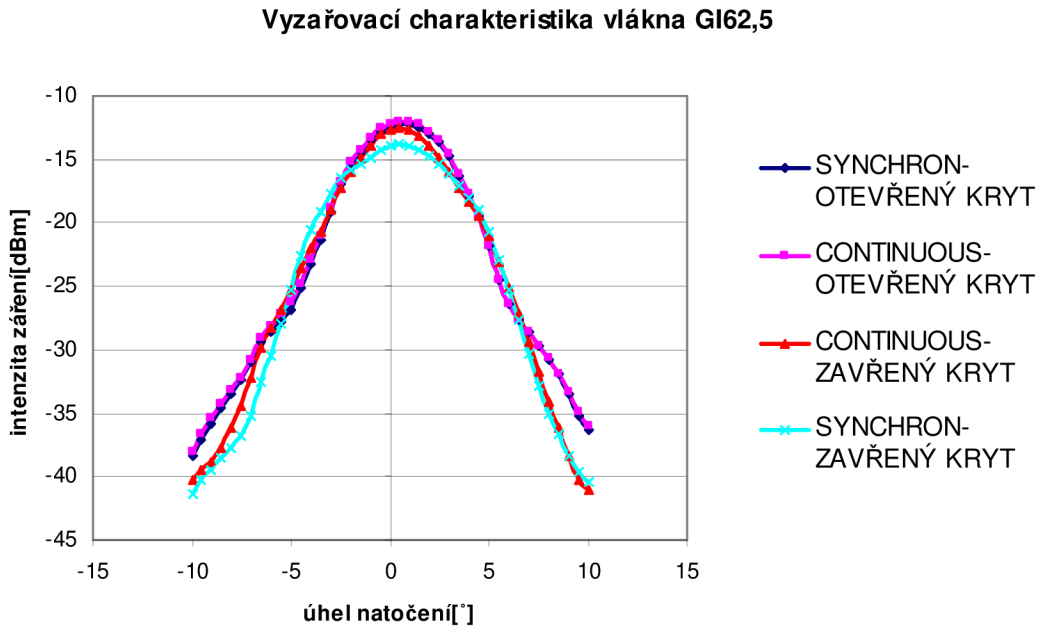
Režim *synchronous* zavřený kryt: NA=0,1165

Režim *continuous* otevřený kryt: NA=0,1159

Režim *continuous* zavřený kryt: NA=0,1166

Toto vlákno stejně jako předchozí, bylo připojeno ke zdroji záření přes spojku (FC-FC). K tomuto vláknu jsem nenašel žádné parametry ani základní popis, ale z jeho charakteristiky, která se pro všechny režimy liší jen minimálně, stejně tak jako jednotlivé NA, se domnívám, že jde opět o jednovidové vlákno podobných parametrů jako je vlákno SM9/125µm.

12.2.4 Měření vlákna GI62,5



Obr. 21 Vyzařovací charakteristika vlákna GI62,5

Režim *synchronous* otevřený kryt: NA=0,0889

Režim *synchronous* zavřený kryt: NA=0,1017

Režim *continuous* otevřený kryt: NA=0,0893

Režim *continuous* zavřený kryt: NA=0,0973

V tomto případě jde o vlákno mnohavidové gradientní připojené k vláknu zdroje pomocí spojky (FC-FC). U tohoto vlákna by se k měření měl používat LED zdroj z důvodu širšího světelného svazku a měřit by se mělo v kontinuálním režimu viz [9]. Já jsem měření prováděl ve všech režimech a k dispozici jsem měl pouze laserový zdroj a to je důvod, proč jsou průběhy vyzařovacích charakteristik různé a tudíž se liší NA. U tohoto vlákna by se NA měla pohybovat kolem hodnoty 0,2 ale mnou naměřená hodnoty byla nejvýše 0,1017. Důvod tohoto rozdílu je ten, že vidová plocha zdroje záření je užší než jádro měřeného vlákna, což vede k nepřesnému měření a zkreslení hodnot NA i průběhů vyzařovací charakteristiky.

12.3 Shrnutí měření NA pomocí měřicího systému SOMS

Z měření pro jednotlivé druhy vláken je patrné, že nejpřesnější je měření jednovidových vláken, které mají malý průměr jádra. Protože laserový zdroj v těchto případech je schopen poskytnou dostatečnou vidovou plochu, abychom mohli vlákno proměřit bez zkreslení a s poměrně velkou přesností. U mnohavidových vláken tomu tak ovšem není, protože mají větší průměr jádra, než je vidová plocha vyzařovaná laserovým zdrojem záření.Tento stav vede ke zkresleným průběhům vyzařovacích charakteristik a k nižším hodnotám NA oproti jejich reálné hodnotě. Tomuto tvrzení odpovídá i věta: Mnohavidová optická vlákna s laserovým zdrojem – pro ověření, že měřená Numerická Apertura je v našem případě omezená nejen geometrickými rozměry vláken, ale i velikostí vidové plochy a rozložením vidů světelného zdroje (úzký svazek = NA menší než dosažitelná), jak uvádí zdroj [9] .

Problém byl také s nastavením zdroje záření a to tak, že měření nefungovalo s jiným nastavením, než EXT MODE, přičemž ale zdroj neměl modulační signál. Z uvedeného důvodu nebyl prakticky žádný rozdíl mezi měřením v *Synchronous* a *Continuous* režimu. V případě, že by synchronní režim fungoval (zdroj optického záření by byl modulován), mohly by výsledky být pravděpodobně o něco přesnější a méně zkreslené, protože v tomto režimu se potlačuje šum a zbytkové světlo a je možné měřit i signály menší, než je samotný šum.

Další naměřená vlákna, jejich parametry a naměřené výsledky jsou uvedeny na přiloženém CD ve složce: *Měření_optických_vláken.*

13 VLASTNÍ MĚŘENÍ LUMINISCENČNÍCH DIOD POMOCÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU SOMS

Postup při měření LED diod na měřicím systému SOMS je obdobný, jako u měření NA v kapitole 12. Proto u měření postupujeme obdobně s výjimkou použitého přípravku, který je navržený k upevnění luminiscenčních diod a nastavení režimu měření. Ten volíme vždy *Continuous* z důvodů, že LED dioda je napájena nemodulovaným napětím, což také vyžaduje optické stínění(zavřené víko) celého měřicího systém.

Jinak je však nastavení volné a volí ho každý uživatel dle sebe. Například když by měl student proměřit LED diodu s vyzařovacím úhlem 10° je dostačující proměřit rozsah ±15°. Tento postup dosti velikou rezervu k proměření potřebné části vyzařovací charakteristiky. Krok měření volíme dle potřeby vždy tak, aby byly body od sebe nepříliš vzdálené. V opačném případě by docházelo k většímu zkreslení výsledného grafu.

Nastavení a postup měření viz. kapitoly 10 a 12.

13.1 Zpracování výsledků měření

Při ukončení měření vygeneruje měřicí systém SOMS dokument pro program Microsoft Excel do předem nastavené složky, jak je uvedeno v kapitole 12. Tyto výsledky jsem zpracovával graficky pomocí programu MATLAB. Nejprve jsem však musel převést naměřenou hodnotu intenzity záření na relativní intenzitu, což se provádí podělením dané hodnoty intenzity záření maximální naměřenou hodnotou intenzity. Dosáhneme tak rozsahu hodnot v intervalu <0;1> , což je výhodné pro odečet hodnot úhlů pro polovinu (0,5) maximální relativní intenzity viz. kapitola 7. Toto je snadné realizovat přímo v Excelu, avšak musíme nastavit desetinou tečku místo čárky (menu Nástroje→Možnosti, karta Mezinárodní), aby EXCEL správně počítal vzorce. To je nutné také z toho důvodu, že MATLAB pracuje s tečkovou konvencí a čárky používá jako oddělovač čísel v matici.

K vygenerování grafu v MATLABu jsem použil m-file, který je součástí přílohy na CD ve složce: *Měření_LED_diod*. K tomu, aby m-file fungoval, je potřeba vytvořit dvě proměnné X a Y, jenž po jejich otevření můžeme naplnit daty. Do proměnné X vkládáme naměřené hodnoty úhlů a do Y pak relativní intenzity. Výsledný graf je klasický typ XY, kde na ose x jsou vynesené naměřené úhly a na ose y jsou vynesené hodnoty maximální intenzity. Toto zobrazují Obr.22-25 . Z grafu jde pak jednoduše odečíst hodnoty krajních úhlů pro poloviční relativní intenzitu viz. kapitola 7, jenž

popisuje vyzařovací úhel svítivých diod. Z těchto krajních bodů zjistíme žádanou hodnotu vyzařovacího úhlu měřené LED diody.

13.2 Zadané LED diody k proměření a otestování přípravku k uchycení

Na otestování funkčnosti přípravku jsem dostal LED diody o různých parametrech, avšak bez bližší specifikace tak, abych si mohl hodnoty ověřit v katalozích výrobců. Takže jsem mohl vycházet pouze z dodaných parametrů, které ukazuje Tab.3.

č.	Označení	Ø [mm]	Vlnová délka [nm]	Svítivost [mCd]	Vyzařovací úhel [°]	Optimální proud [mA]	Optimální napětí [V]
1	BLUE DARK	5	450~460	2000	30	20	2,8-3,4
2	PURE GREEN	5	525	13000	10	20	2,1
3	RED	5	640	1100	20	20	2,1
4	BLUE	5	470	4500	10	30	3,3
5	RED	5	635	5000	10	20	2,1
6	GREEN	5	567~573	800	30	20	2,4
7	YELLOW	5	590	13000	10	20	2,1
8	BLUEGREEN	5	500	8000	20	20	3,3
9	ORANGE	5	605	4000	20	20	2,1
10	RED	5	624	13000	10	20	2,1
11	UV	5	385~390	-	40	20	3,5
12	IR	5	940	-	20	100	1,4
13	IR	5	850	-	10	50	1,5-1,8

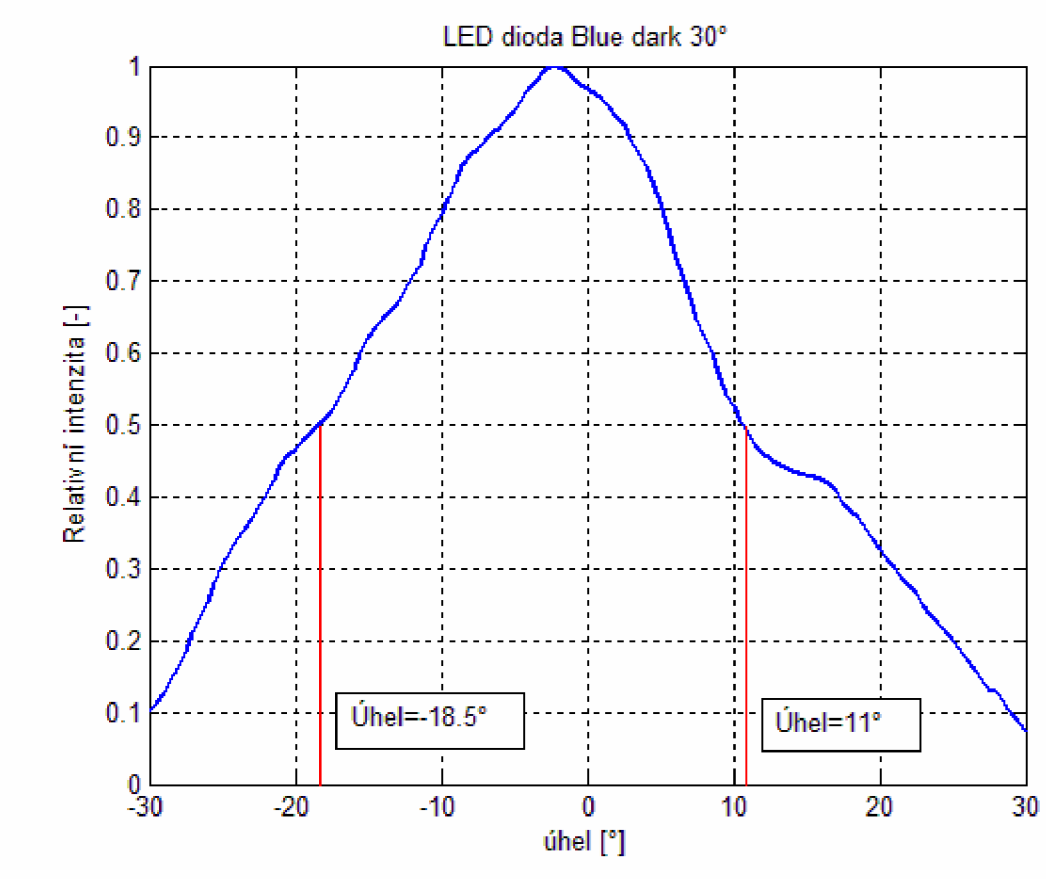
Tab. 3 Parametry LED diod k otestování přípravku

13.3 Naměřené hodnoty a grafy

Od každého typu jsem měl k dispozici vždy dva kusy LED diod, proto jsem každé měření prováděl dvakrát. Avšak zde v práci udávám grafy a odečtené hodnoty jen pro jeden průběh(vždy ten lepší), tak abych se vyvaroval vyšším chybám, které jsou u každého kusu individuální. Všechny naměřené hodnoty a grafy jsou však k dispozici na přiloženém CD ve složce: *Měření_LED_diod.* Z důvodů úspory místa neuvádím v této

práci pouze nejzajímavější naměřené průběhy a výsledky, které dostačují k demonstraci a prezentaci funkčnosti navrženého přípravku.

13.3.1 Měření LED diody číslo 1 označené BLUE DARK

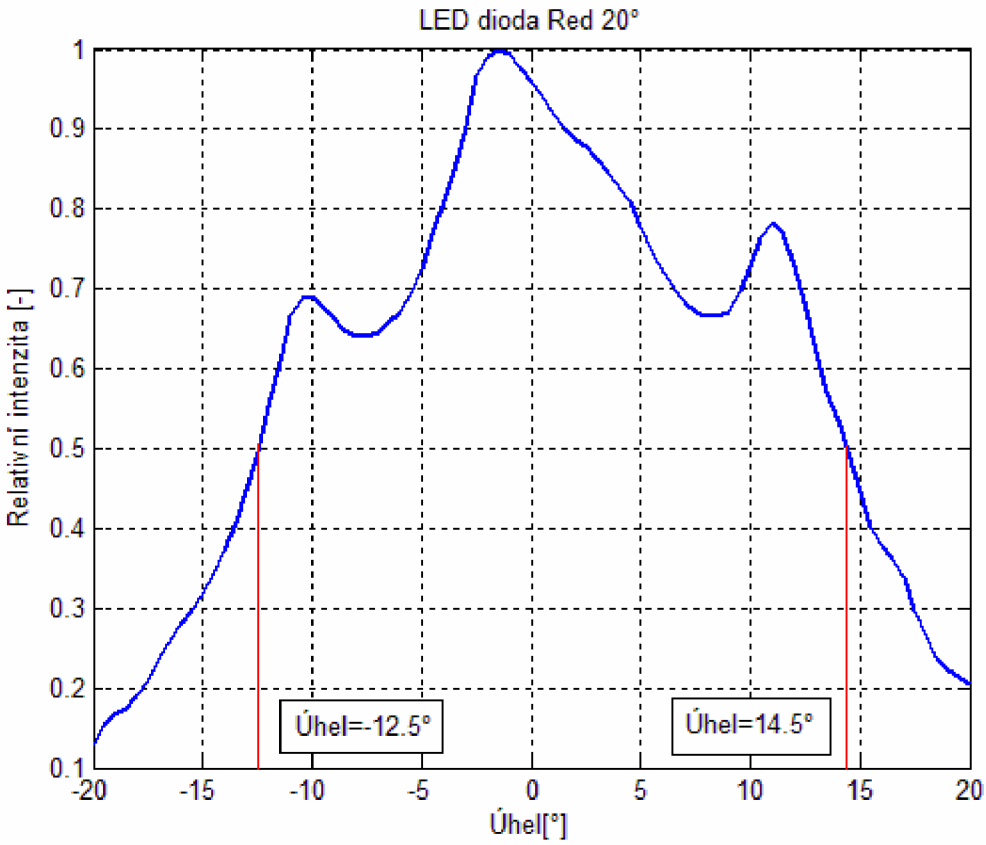


Obr. 22 Vyzařovací charakteristika LED diody č.1 označené BLUE DARK

Vyzařovací úhel daný parametry:	30˚
Vyzařovací úhel odečtený z grafu:	29,5˚
Rozdíl dané a naměřené hodnoty úhlu:	0,5˚

Naměřený průběh je poměrně hladký a hodnota odečtená z grafu je velice blízká hodnotě udané v parametrech LED diody. Proto si dovolím konstatovat, že pro tento typ LED diody je použití měřicího systému SOMS v kombinaci s mnou navrženým přípravkem na upevnění luminiscenčních diod pro učební účely velice vhodný. Je také dostačující k ověření parametrů těchto LED diod.

13.3.2 Měření LED diody číslo 3 označené RED

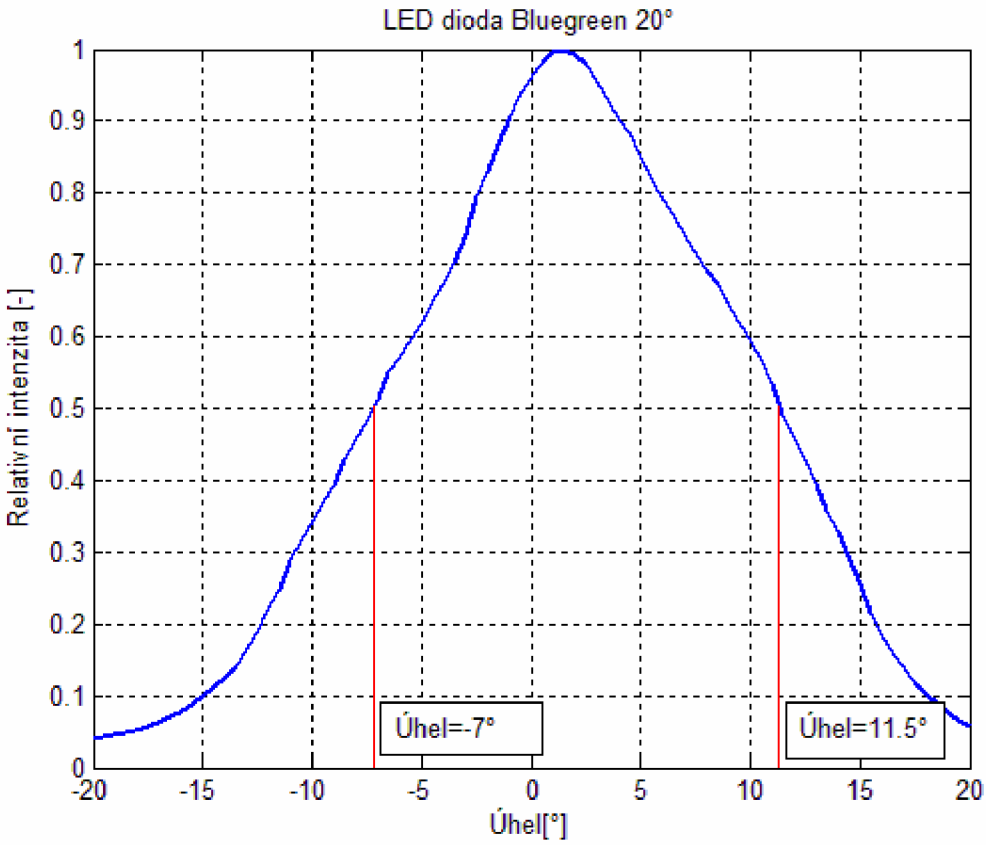


Obr. 23 Vyzařovací charakteristika LED diody č.3 označené RED

Vyzařovací úhel daný parametry:	20˚
Vyzařovací úhel odečtený z grafu:	27˚
Rozdíl dané a naměřené hodnoty úhlu:	7˚

Tento naměřený průběh je rozdílný oproti předešlému tím, že má 3 lokální maxima. Toto je pozorovatelné i okem při nastavování a kalibraci LED diody proti optickému přijímači, kde kolem středu je další prstenec se silnější intenzitou záření oproti okolí. Rozdíl odečtené hodnoty a hodnoty dané parametry je větší než v předešlém případě, avšak v katalozích různých výrobců se většinou objevují maximální a minimální hodnoty vyzařovacích úhlů, kde rozdíl maxima a minima je okolo 6-10˚. Protože však mám parametry zadané a opírám se o hodnotu 20˚, musím konstatovat, že tento typ LED diod se nedá změřit pomocí systému SOMS příliš přesně.

13.3.3 Měření LED diody číslo 8 označené BLUEGREEN

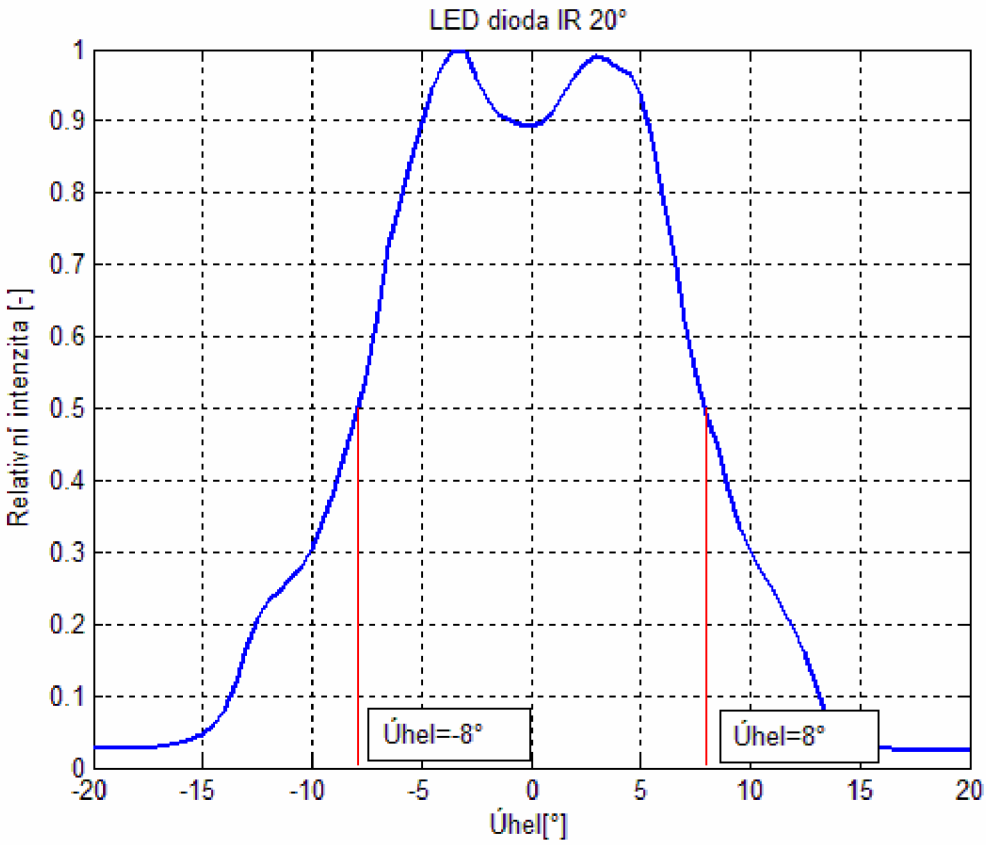


Obr. 24 Vyzařovací charakteristika LED diody č.8 označené BLUEGREEN

Vyzařovací úhel daný parametry:	20˚
Vyzařovací úhel odečtený z grafu:	18,5˚
Rozdíl dané a naměřené hodnoty úhlu:	1,5˚

U tohoto grafu jde opět o hladký průběh s nepříliš velkým rozdílem odečtené hodnoty od hodnoty, kterou udávají parametry. Graf není nijak zdeformován nebo omezen z čehož plyne, že u těchto typů LED diod měřicí systém SOMS umožní změřit hodnoty, které mají dobré využití pro výuku.

13.3.4 Měření LED diody číslo 12 označené IR



Obr. 25 Vyzařovací charakteristika LED diody č.12 označené IR

Vyzařovací úhel daný parametry:	20˚
Vyzařovací úhel odečtený z grafu:	16˚
Rozdíl dané a naměřené hodnoty úhlu:	4˚

Tento průběh má na vrcholu lokální minimum, což si myslím, že je zkreslení, které může vznikat tím, že optický přijímač reaguje na omezenou vlnovou délku záření. Avšak hodnota odečtená a daná parametry se neliší příliš. Stejně jak v předešlém případě nemohu rozhodnout, zda hodnota spadá do tolerance nebo ne, protože mám k dispozici pouze jeden parametr vyzařovacího úhlu.

Stěžejním problémem však u tohoto typu LED diod je to, že infra spektrum záření je pro člověka neviditelné. Z toho důvodu jsem nemohl nastavit LED diodu tak, aby zářila co nejvíce na střed optického přijímače, ale jen orientačně dle odhadu. A ověřování zda LED dioda vůbec svítí, jsem musel provádět přes digitální fotoaparát.

13.4 Shrnutí měření LED diod pomocí měřicího systému SOMS

Z měření pro jednotlivé LED diody vyplývá, že shodnost naměřených a následně odečtených hodnot s hodnotami, které jsou uvedeny v parametrech, je závislá na typu luminiscenční diody, svítivosti a vlnové délce. U některých typů totiž v části, kde by měla být maximální intenzita je výsledech zkreslen. Podle mého úsudku jde o přebuzení optického přijímače, které se následně projeví posunem celého průběhu, což zkreslí odečtené hodnoty vyzařovací charakteristiky. Další věcí, jenž může ovlivnit výsledek je vlnová délka vyzařovaného záření, protože žádný optický přijímač nemá v celém světelném spektru stejnou přesnost. Tím může vznikat různá chyba měření u odlišných typů LED diod. Bohužel v dokumentaci k měřicímu systému SOMS jsem se nedočetl bližší specifikaci k optickému přijímači a k jeho parametrům. Tudíž nemůžu toto tvrzení potvrdit, ale ani vyvrátit.

Pro přehled a porovnání přikládám tabulku popisující naměřené hodnoty a hodnoty dané v parametrech všech LED diod, co jsem měl k dispozici viz. Tab.4.

č.	Označení	Vyzařovací úhel daný měřením [°]	Vyzařovací úhel daný parametry [°]
1	BLUE DARK	28,5	30
2	PURE GREEN	9,25	10
3	RED	27	20
4	BLUE	10,25	10
5	RED	10,25	10
6	GREEN	21	30
7	YELLOW	13,5	10
8	BLUEGREEN	18,5	20
9	ORANGE	24,5	20
10	RED	16,5	10
11	UV	28,5	40
12	IR	16	20
13	IR	12,5	10

Tab. 4 Výsledky měření LED diod

Z tabulky je patrné, že největší rozdíly se vyskytují u některých typů červených LED diod a u UV LED diody, jenž vykazuje největší rozdíl mezi hodnotou odečtenou z měření a hodnotou, kterou udávají parametry. Naopak diody s modrým zářením mají odchylky oproti udaným parametrům minimální a dovolím si tvrdit, že spadají do povolených rozsahů.

U mnohamilionové výroby není možné zajistit, aby všechny vyrobené kusy měly naprosto shodné parametry, proto jsou dány tolerance do, kterých součástky musí spadat aby vyhovovaly normám a požadavkům na použití.

14 ZÁVĚR

Při tvorbě práce jsem se musel nejdříve seznámit s měřicím systémem a s jeho parametry a měřicími možnostmi. Dále pak udělat průzkum v možnostech měření NA a systémech, které toto podporují. Následně jsem odměřil několik optických vláken a provedl porovnání naměřených hodnot s hodnotami katalogovými za účelem osvojení práce s měřicím systémem SOMS a zjištěním funkce systému a jeho přesnosti. Tyto poznatky jsem dále využíval u návrhu modifikace systému pro měření vyzařovacích úhlů LED zdrojů, převážně tedy při tvorbě nastavitelného držáku pro luminiscenční diody. Pro ověření funkčnosti držáku a jeho použití v měřicím systému jsem provedl měření na LED zdrojích o různých parametrech (vlnová délka, barva, průměr, způsobu vyzařování a další). Všechny tyto naměřené údaje, výpočty i způsob tvorby přípravku pro uchycení LED diod a jeho následná realizace jsou obsahem této bakalářské práce. Tyto poznatky získané měřením a obsažené v této práci mohou být dále využity k výukovým účelům na VUT Brno, kde je k dispozici měřicí systém SOMS, který s modifikací je schopen měřit nejen NA, pro kterou je určen, ale také vyzařovací charakteristiky LED diod. Samozřejmě hodnoty získané z modifikovaného měřicího systému SOMS nemají jen demonstrativní účel ve výuce, ale také praktické využití v technice. Aplikační možnosti optických zdrojů záření (v mém případě LED diod) a optických vláken se neustále rozšiřují a dovolím si tvrdit, že tento trend bude dále pokračovat. Toto tvrzení dokládám intenzivním vývojem nových LED diod pro televizory a monitory nebo výrobou čím dál efektivnějších a ekonomičtějších osvětlovacích prvků s využitím LED technologií. Tento trend posledních několika let navíc silně získává na dynamice a neustále zrychluje. U optických vláken, které jsou známé pro své využití v telekomunikaci a přenosu dat, se v poslední době objevila také spousta dalších využití jako například v měřicí technice v solární energetice a dalších odvětvích, ve kterých dříve optická vlákna využití neměla.

Při měření numerické apertury jsem ověřil, že systém s komponenty, jenž jsem měl k dispozici je nejvhodnější pro měření jednovidových optických vláken, protože laserový zdroj není originálním zdrojem záření, který je běžně s tímto systémem dodáván. Tudíž je dostačující pouze k měření vláken s malým průměrem jádra, jakými jsou jednovidová vlákna. Je to způsobeno malou vidovou plochou, kterou tento laserový zdroj poskytuje. V kombinaci s vícevidovými vlákny, je ale vyzařovaná plocha menší než plocha jádra, což zkresluje výslednou NA pro tyto typy vláken. Toto tvrzení jsem podložil naměřenými hodnotami NA na optických vláknech a následným porovnáním s hodnotami udávanými v katalogu výrobců viz. Tab 2. Přičemž u jednovidových vláken a vláken s malým průměrem padaly naměřené hodnoty NA do tolerance, jež výrobce udával pro tyto vlákna. Naopak u vícevidových vláken a vláken s větším průměrem se tyto naměřené a katalogové hodnoty lišily někdy i o desítky procent.

Při měření vyzařovacích charakteristik a úhlů LED diod na měřicím systému SOMS jsem vycházel hlavně z poznatků nabytých z předchozího měření NA a také z toho, že mnou navržený přípravek modifikující měřicí systém bude dále využíván k výukovým účelům. Proto bylo stěžejním bodem pro vytvoření přípravku pro uchycení LED diod to, aby manipulace s ním byla snadná, bez větších zásahů a úprav měřicího systému oproti základnímu nastavení pro měření NA. Přitom však musela být zachována přesnost měření a výsledky měření musely být smysluplné, tudíž bez větších odchylek od parametrů, jež udává výrobce. Toto si myslím, že bylo splněno a těmto podmínkám můj přípravek vyhovuje. Samozřejmě nemohu prohlásit, že naměřené hodnoty jsou naprosto totožné s katalogovými. LED nemají vždy shodné parametry, proto výrobce udává pouze rozsah, kde se hodnoty základních parametrů LED diod pohybují. Další zkreslení výsledků vnáší do měření nedokonalé světelné stínění, které se v měřicím módu *Continuous* projeví jako rušivé nežádoucí světlo. Dalším omezením přesnosti měření je citlivost optického přijímače na vlnovou délku přijímaného záření, z čehož plyne zkreslení pro některé vlnové délky. V celku ale je modifikovaný měřicí systém SOMS dostatečně přesný a názorný k tomu, aby mohl být využitý jako učební a experimentální měřicí systém pro studenty VUT Brno.

K danému měřicímu systému bych doporučil jej rozšířit o LED zdroj záření, na který by bylo možné připojit optická vlákna tak, aby systém spolehlivě a hlavně přesně mohl měřit NA i pro optická vlákna vícevidová, ať už gradientní nebo i se skokovým indexem lomu. Dalším rozšířením systému by mohlo být zabudování napájecích kabelů určeným k napájení LED diod přímo do měřicího systému, protože vedením kabelů přes víko dochází k jejich lámání a mechanickému poškozování. K urychlení připojování LED diod na zdroj energie bych doporučil použít místo krokosvorek vytvořenou patici, do které by se zasunuly nožičky měřené LED diody a zrychlila by se tak podstatně práce s tímto přípravkem. Jednou z dalších možných modifikací by mohlo být propojení měřicího systému s měřenou LED diodu tak, aby byla napájena modulovaným signálem, čímž by se měřicí systém rozšířil i o možnost měřit s otevřeným krytem na měřicím módu *Synchronou.*

Literatura

[1] *Optické vlákno* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2011. Datum poslední revize 5. 05. 2011. [citováno 24. 05. 2011] <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno&oldid=6864985>

[2] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 3. díl - Optoelektronika - optoelektronické prvky a optická vlákna*. BEN - technická literatura, 2005 ISBN 80-7300-184-5

[3] BEJČEK, Ludvík . Vláknová optika v automatizaci. Brno: Vysoké učení technické. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 56 s. Skripta. VUT Brno.

[4] SALEH, Bahha E. A.- TEICH, Malvin Carl. Základy fotoniky. svazek 2. Praha : Vydavatelství MFF UK, 1994. 436 s. ISBN 80-85863-02-2

[5] KROHN, D. A. Fiber optic sensors. USA : ISA, 2000. 288 s. ISBN 1-55617-714-3

[6] *Jednovidové optické vlákno* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. c2011. Datum poslední revize 26. 04. 2011. [citováno 24. 05. 2011] <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Jednovidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno&oldid=6821187>

[7] *Vícevidové optické vlákno* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. c2010. Datum poslední revize 11. 04. 2010. [citováno 24. 05. 2011] <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=V%C3%ADcevidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno&oldid=5209142>

[8] Safibra, s.r.o. – Měření numerické apertury[online]. c1999-2009. [citováno 24.05.2011].< http://www.safibra.cz/cesky/produkty/individual/apertura.html>

[9] Úloha č. 2 – Měření Numerické Apertury optických vláken.
Dostupné z:< www.comtel.cz/files/download.php?id=3185> [citováno 24.05.2011]

[10] Fiber Optical Catalog.
Dostupné z:
< http://www.interlink.co.th/dcdetail_images/Fiber%20Optic%20Catalog.pdf> [citováno 24.05.2011]

[11] LEBEL, Radek. *LED historie*[online]. c2010. [citováno 24. 05. 2011]. <http://www.ledka.eu/Hlavn%C3%AD_strana/LED_historie.html>

[12] Přispěvatelé Wikipedie. *LED* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. c2011. Datum poslední revize 27. 04. 2011. [citováno 24. 05. 2011] <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=LED&oldid=6827980>

[13] REICHL, Jaroslav – VŠETIČKA, Martin. *Optická vlákna::MEF::Encyklopedie Fyziky*[online].c2006-2011. [citováno 24.05.2011]

<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=557&print=1>

Seznam příloh

Příloha 1. CD/DVD Bc-2011-VEJMOLA

Toto CD obsahuje složky: *Dokumentace_přípravku_LED*
Měření_LED_diod
Měření_optických_vláken