



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVA PRO KONFOKÁLNÍ MIKROSKOP S DUÁLNÍM RASTROVÁNÍM

ILLUMINATING SYSTEM FOR A TANDEM-SCANNING CONFOCAL MICROSCOPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ SLABÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. RADIM CHMELÍK, Ph.D.

BRNO 2008

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá možnostmi návrhu osvětlovací soustavy konfokálního mikroskopu s duálním rastrováním. Nevýhodou tohoto mikroskopu je použití vysokotlaké rtuťové výbojky, která vyžaduje vodní chlazení a neumožňuje seřizování osvětlovací soustavy za chodu mikroskopu. Proces seřizování je proto náročný a nepřesný a soustava využívá velice malé množství světla produkovaného výbojkou. V práci je uvažováno využití výkonných LED diod a halogenových žárovek. Nejprve je provedeno měření pro získání parametrů jednotlivých optických prvků stávající osvětlovací soustavy. Poté jsou vytvořeny jednotlivé návrhy a fotometrické analýzy v programu ZEMAX. Vybraný návrh osvětlovací soustavy je experimentálně ověřen. V závěru je provedeno pozorování při využití osvětlovací soustavy navržené pro LED diodu.

Summary

The diploma thesis deals with a design of illuminating system for a tandem-scanning confocal microscope. A disadvantage of this microscope is use of a high pressure mercury lamp, which requires water cooling and does not allow adjusting of the illuminating system while running. Adjusting process is therefore difficult and inaccurate and the system uses very small amount of light produced by mercury lamp. Therefore use of high-power LED and halogen lamp is considered. First a measurement is made to obtain parameters of the existing illuminating system components. Then single designs and their photometric analyses are carried out using ZEMAX optical design program. Selected design of illuminating system is experimentally proved. Finally an observation is made with the use of illuminating system designed for LED.

Klíčová slova

Fotometrie, konfokální mikroskop, LED, TSRLM, osvětlovací soustava, ZEMAX.

Keywords

Photometry, confocal microscope, LED, TSRLM, illuminating system, ZEMAX.

SLABÝ, T. *Osvětlovací soustava pro konfokální mikroskop s duálním rastrováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 76 s. Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Radim Chmelík, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Radima Chmelíka, Ph.D., a že veškerá použitá literatura je v této práci uvedena.

V Brně dne 23.5.2008

.....

Poděkování

Děkuji doc. RNDr. Radimovi Chmelíkovi, Ph.D. za vedení při tvorbě diplomové práce. Můj velký dík patří také Ing. Ludkovi Lovicarovi za cenné rady, doc. MUDr. Milanu Hadravskému, CSc. za poskytnuté informace o konfokálním mikroskopu Confocal 2002 a Ing. Jiřímu Krškovi za pomoc při měření parametrů optických prvků. V neposlední řadě děkuji svým rodičům za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

1 Úvod	12
2 Konfokální mikroskop	14
2.1 Konfokální mikroskop s duálním rastrováním	15
2.2 Využívané zdroje světla pro TSRLM	16
2.3 Alternativní zdroje světla pro TSRLM	17
3 Konfokální mikroskop Confocal 2002	20
3.1 Měření parametrů optických prvků mikroskopu	22
4 Analýza soustavy v systému ZEMAX	28
4.1 Nesequenční mód systému ZEMAX	28
4.2 Analýza osvětlení a světelného toku v systému ZEMAX	28
4.3 Analýza obrazu v rovině aperturní čočky	31
5 Návrh osvětlovací soustavy	34
5.1 Výběr vhodné LED diody	34
5.2 Návrh s využitím parabolického zrcadla	36
5.3 Návrh s využitím eliptického zrcadla	41
5.4 Návrh s využitím čočkového kolektoru	47
5.5 Návrh s využitím sférického kondenzoru	50
5.6 Návrh s využitím kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05	53
5.7 Návrh s využitím kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěným v rovině aperturní clonky	57
5.8 Porovnání jednotlivých návrhů osvětlovací soustavy	58
6 Ověření výsledků analýzy	60
6.1 Konstrukční návrh přípravku pro uchycení zdroje	60
6.2 Experiment	61
6.3 Pozorování	64
7 Závěr	70
Literatura	71
Seznam příloh	72
Přílohy	74

1 Úvod

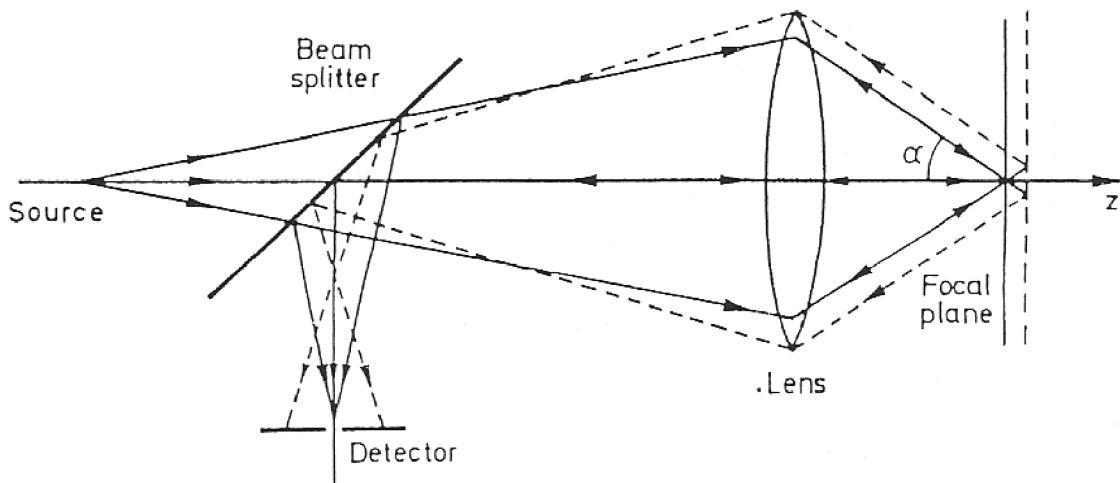
V současné době je na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně umístěn a využíván konfokální mikroskop reflexního typu s duálním rastrováním. Tento mikroskop byl zkonstruován v roce 1986. Mikroskop je stále plně funkční, avšak současná konstrukce jeho osvětlovací soustavy využívá jako zdroj vysokotlaké rtuťové výbojky. Výhoda rtuťových výbojek je nesporná, dosahují velkých výkonů potřebných pro konfokální mikroskop, avšak přináší také řadu nevýhodných vlastností. Výbojky se za provozu silně zahřívají a produkují ozón, celá konstrukce se proto neobejde bez vodního chlazení. Přitom však mikroskop využívá velice malé množství světla z celkového výkonu výbojky. Další nevýhodou této konstrukce je nemožnost seřizování polohy zdroje za chodu mikroskopu. Seřízení je možné pouze po vypnutí mikroskopu a demontáži domečku, ve kterém je výbojka uchycena. Seřizování navíc ztěžuje skutečnost, že výbojka nesmí být zapnuta bezprostředně po vypnutí. V neposlední řadě je nepříjemnou vlastností také hlučnost zdroje 200 W výbojky.

Cílem diplomové práce je návrh úpravy osvětlovací soustavy mikroskopu, která by umožnila nahradit rtuťovou výbojku jiným světelným zdrojem (halogenovou žárovkou či výkonnou LED diodou), případně vedla ke zvýšení detekované intenzity světla.

V práci se zabývám návrhem osvětlovací soustavy pro tento mikroskop s využitím výkonných LED diod. V dnešní době jsou již na trhu dostupné takové diody, které by mohly při využití většiny jejich výkonu být vhodnými zdroji pro konfokální mikroskop s duálním rastrováním. Při využití LED diod v osvětlovači by odpadla nutnost vodního chlazení. Diodu je také možné opětovně zapnout ihned po vypnutí. Přitom životnost diod je oproti výbojkám několikanásobně vyšší a důležitou výhodou je také nižší cena. Návrh osvětlovací soustavy s využitím výkonných LED diod by tedy přinesl kompaktnější konstrukci mikroskopu, levnější provoz a také jednodušší práci.

2 Konfokální mikroskop

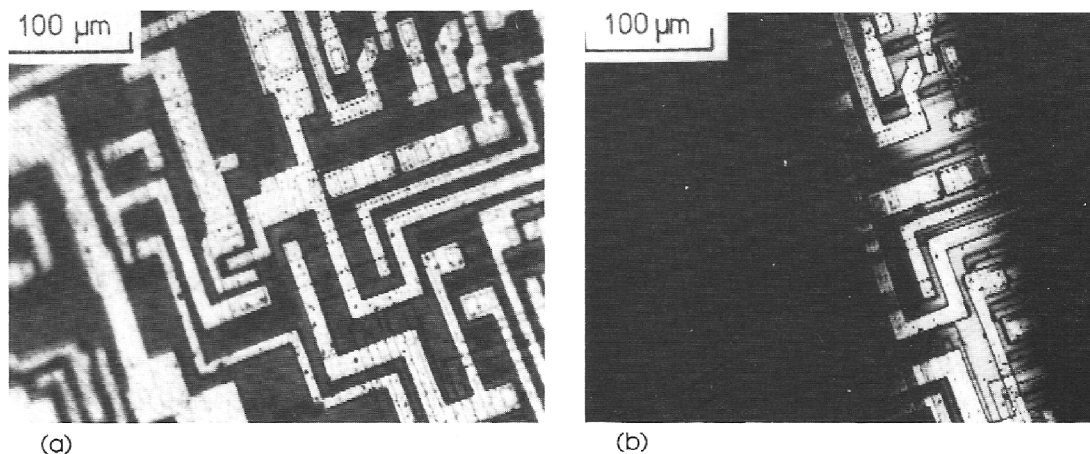
Princip konfokálního mikroskopu byl poprvé popsán a patentován americkým vědcem Marvinem Minským v roce 1957 [1]. Vznik tohoto zařízení byl podmíněn především potřebami biologů. Dosud používané klasické optické mikroskopy sice vyhovovaly při pozorování tenkých biologických vzorků, u tlustých vzorků však bylo pozorování rušeno rozostřenými částmi překrývajícími zkoumané místo. Právě tuto nevýhodu konfokální mikroskop odstraňuje díky svému principu činnosti. Hlavní vlastností konfokálního mikroskopu je hloubková diskriminace, která se projevuje tak, že ve výsledném obraze jsou zobrazeny pouze zaostřené roviny vzorku, rozostřené části jsou mikroskopem odfiltrovány a jeví se tedy jako tmavé (obr. 2). A právě tato vlastnost konfokálního mikroskopu je také hlavním důvodem jeho častého využití v biologickém výzkumu. Konfokální mikroskop však zároveň přináší i řadu dalších výhod oproti konvenčním optickým mikroskopům. Disponuje například lepším příčným rozlišením a poskytuje také možnost trojrozměrné rekonstrukce pozorovaného povrchu [2]. K nevýhodám naopak patří nedostatek světla a také skutečnost, že konfokální mikroskop vždy zobrazuje pouze bod (popř. skupinu bodů) v jednom okamžiku. S tímto problémem se však lze konstrukčně vypořádat pomocí rastrování.



Obr. 1: Schéma konfokálního optického systému [2].

Hlavní myšlenkou konfokálního mikroskopu je princip bodového zdroje a bodového detektoru. Zatímco u konvenčních optických mikroskopů je vzorek osvětlován plošným zdrojem a detekován plošným detektorem, konfokální mikroskop využívá bodového zdroje a bodového detektoru. Schéma konfokálního mikroskopu je na obr. 1. Jako vhodné aproximace bodového zdroje se využívá osvětlené clonky velmi malého průměru. Tím je zajištěno, že informace je získávána pouze z jedné konkrétní hladiny předmětu. Clonka je zobrazena objektivem do roviny vzorku, kde osvětluje pouze velice malou plošku. Takto je omezeno nežádoucí rozptýlené světlo, které by se šířilo ze vzorku v případě osvětlení celé jeho plochy. Obraz osvětlené části je dále přenášen stejným objektivem (reflexní typ), popřípadě tzv. kondenzorem (transmisní typ), na detektor, před nímž je umístěna další clonka. Tato clonka zajišťuje, že na detektor dopadne pouze světlo z předmětové

roviny objektivu (plná čára na obr. 1), světlo z ostatních rovin vzorku je clonkou výrazně odfiltrováno (přerušovaná čára na obr. 1). Takto je realizován bodový detektor. Ve výsledném obrazu je tedy zobrazena pouze část vzorku nacházející se v předmětové rovině objektivu mikroskopu, zatímco nezaostřené části vzorku jsou potlačeny. Tak vzniká optický řez vzorkem (obr. 2b).



Obr. 2: Zobrazení téhož vzorku a) konvenčním optickým mikroskopem a b) konfokálním mikroskopem [2].

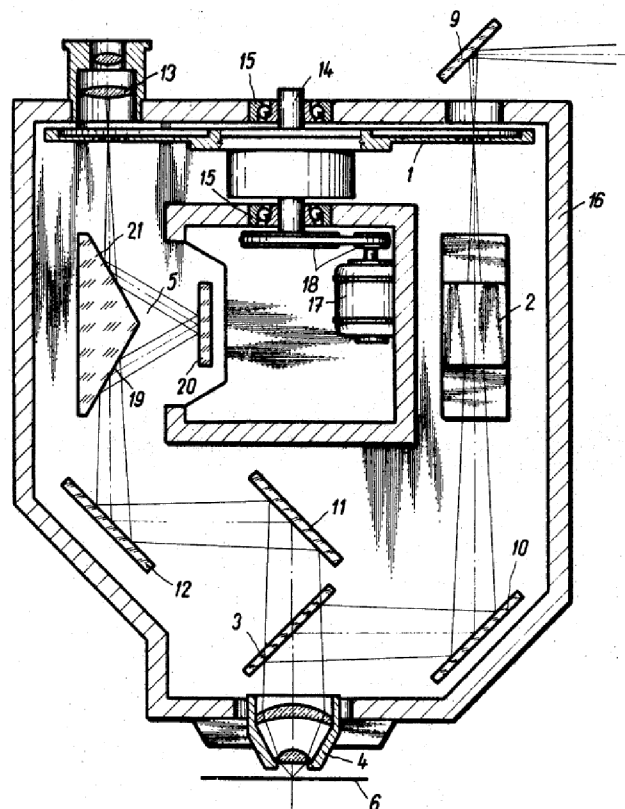
Jak je patrné, tímto způsobem dosáhneme zobrazení jediného bodu vzorku. Zobrazení zorného pole se proto provádí pomocí rastrování. Způsoby rastrování se liší dle dané konstrukce mikroskopu, nejčastěji se však jedná o tyto způsoby rastrování:

- příčným posuvem vzorku před objektivem,
- posuvem objektivu nad vzorkem,
- rozmítáním laserového paprsku,
- pomocí Nipkowova disku.

Výhodou rastrování posuvem vzorku je teoreticky neomezené zorné pole (omezení posuvem stolku). Avšak zatímco první tři uvedené způsoby jsou poměrně pomalé a dosahují rychlosti snímkování kolem 3 snímků za sekundu [3], rastrování pomocí Nipkowova disku dosahuje až stovek snímků za sekundu [2] a je tedy vhodné pro zobrazování v reálném čase. To je výhodné především pro biologická pozorování živých procesů.

2.1 Konfokální mikroskop s duálním rastrováním

Konfokální mikroskop s duálním rastrováním byl poprvé navržen českými vědci Mojžírem Petrářem a Milanem Hadravským v roce 1967 (obr. 3). Byl označován zkratkou TSRLM z anglického názvu Tandem-Scanning Reflected-Light Microscope [4]. Základní myšlenkou je využití většího počtu clonek podílejících se na zobrazování. Tyto otvory jsou umístěny na rotujícím disku (14 na obr. 3) v několika spirálách. Rozměry, uspořádání



INVENTORS
 Mojmir Petráň, Milan
 BY Hadrávký
 Richard Čížek
 opt

Obr. 3: Návrh konfokálního mikroskopu z roku 1967 [5].

a počet otvorů v disku jsou důležité faktory, které ovlivňují kvalitu výsledného obrazu. Celé zorné pole je vytvořeno pohybem jednotlivých otvorů rotujícího disku. V jednom okamžiku je tak osvětleno několik stovek až tisíc otvorů. Otvory musí být umístěny dostatečně daleko od sebe, aby nedocházelo k průniku parazitního světla z vedlejších otvorů. Protože světlo prochází rotujícím diskem dvakrát na dvou protilehlých stranách (před odrazem a po odrazu od vzorku), využívá konfokální mikroskop s duálním rastrováním invertující soustavu (2, 19, 20, 21 na obr. 3), která zajišťuje průchod paprsků odpovídajícími otvory na druhé straně disku.

2.2 Využívané zdroje světla pro TSRLM

Jelikož diskem prochází pouze kolem 1% dopadajícího světla, je množství průchozího světla podílejícího se na zobrazování velice malé. Z toho důvodu je pro zajištění dostatečného osvětlení celého zorného pole nutné používat vysoce výkonných zdrojů světla. Ideálním zdrojem pro TSRLM by byl zdroj bodový, nekoherentní s širokým spektrem

a rovnoměrným zastoupením všech vlnových délek viditelného světla ([2], str. 254).

Při prvních pokusech bylo jako zdroje intenzivního osvětlení využito Slunce. V dnešní době se využívají především vysokotlaké výbojky s krátkým výbojem. Ve výbojkách vzniká světlo při elektrickém výboji mezi dvěma elektrodami v ionizovaných plynech nebo v kovových parách. Plyn tedy obsahuje nosiče elektrického náboje a stává se elektricky vodivým. Narazí-li volný elektron, urychlený v elektrickém poli, na atom plynu, vystoupí jeho valenční elektron na vyšší energetickou hladinu. Na této hladině se ale elektron nemůže udržet trvale a vrací se na původní hladinu. Přebytečnou energii přitom uvolní v podobě světelného záření. Záření, které při tom vzniká, má určitou vlnovou délku, charakteristickou pro příslušnou náplň výbojky. Spektrum záření výbojových zdrojů je čárové. Rozložení spektrálních čar závisí na druhu výboje i na složení a tlaku plynné náplně. U vysokotlakých výbojek dochází vlivem vyššího tlaku k rozšíření spektrálních čar.

Výbojky vynikají vysokým světelným tokem (tisíce lumenů) a světelnou účinností (až 100 lm/W), mají však také celou řadu nevýhodných vlastností. Jsou jimi především nízká životnost (stovky hodin), silné zahřívání a tedy nutnost chlazení, vznik ozonu, špatná směrovost (vyzařují rovnoměrně do celého prostoru a lze tak využít pouze malou část celkového výkonu) a také cena. Rtuťové výbojky dosahují plného světelného toku až asi za 5 minut. Po zhasnutí je nutné vyčkat s dalším zapnutím 3 minuty, až se sníží tlak rtuťových par.

2.3 Alternativní zdroje světla pro TSRLM

Vysoce výkonné elektroluminiscenční diody (LED) by mohly být vhodným zdrojem světla pro osvětlovací soustavu konfokálního mikroskopu s duálním rastrováním. LED dioda je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P–N. Prochází-li přechodem elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje nekoherentní světlo s úzkým spektrem. Může emitovat i jiné druhy záření. Tento jev je způsoben elektroluminiscencí. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. Protože LED diody nemohou přímo emitovat bílé světlo, využívají tzv. luminoforu. Některé bílé LED emitují modré světlo, část tohoto světla je přímo na čipu luminoforem transformována na žluté světlo a díky mísení těchto barev vzniká bílá. Jiné typy bílých LED emitují ultrafialové záření, to je přímo na čipu luminoforem transformováno na bílé světlo [6]. LED diody mají oproti výbojkám několik výhodných vlastností. Jejich životnost se pohybuje v řádech desítek až stovek tisíc hodin, podstatně méně se zahřívají, mají lepší směrovost (jejich čip je plochý a vyzařuje pouze do jedné poloviny), vysokou světelnou účinnost (až 100 lm/W), malé rozměry čipu (v jednotkách mm) a výrazně nižší cenu. Naopak podstatnou nevýhodou je jejich omezený světelný tok dosahující maximálně stovek lumenů.

Dalším alternativním zdrojem by také mohly být halogenové žárovky. Halogenové žárovky jsou řazeny mezi tzv. teplotní světelné zdroje. U teplotních zdrojů dochází průchodem el. proudu k zahřátí vlákna na teplotu, při které potřebnou budící energii vytváří tepelný pohyb. Tato energie se předává částicím, které jsou schopny vybuzení či ionizace a které se pak stávají elementárními zdroji světla. Spektrum teplotního záření je spojitě. Halogenové žárovky jsou naplněny směsí halogenu. Tato náplň umožňuje vyšší provozní teploty vlákna a zvyšuje jeho životnost. Protože žárovky za provozu dosahují tlaků

mnohonásobně vyšších než atmosférický tlak a teplot kolem 250°C, může být prasknutí baňky nebezpečné. Z důvodu vysokých teplot jsou baňky vyráběny z křemenného skla. Halogenové žárovky dosahují světelné účinnosti až 20 lm/W a světelného toku v řádech stovek až tisíc lumenů. Nevýhodami halogenových žárovek oproti LED diodám jsou větší rozměry vlákna (desítky milimetrů) i celé baňky a horší směrovost (vyzařují světlo do všech směrů). Výhodou oproti výbojkám je nižší cena.

3 Konfokální mikroskop Confocal 2002

Sestava konfokálního mikroskopu Confocal 2002 (obr. 4), umístěná na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně, byla navržena za spolupráce Mojžíry Petráně, Milana Hadravského a Miroslava Malého v roce 1986 a vyráběna v JZD Komorno. Jde o reflexní konfokální mikroskop s duálním rastrováním (TSRLM).



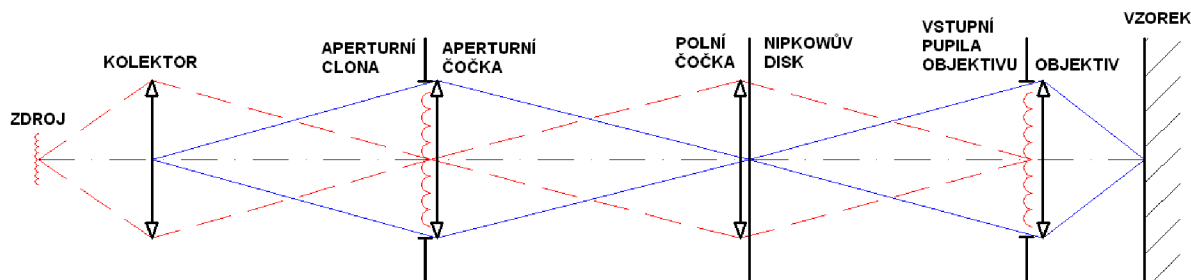
Obr. 4: Sestava konfokálního mikroskopu Confocal 2002.

Optická soustava mikroskopu je tvořena objektivem, okulárem a dále šesti čočkami osvětlovací soustavy, pěti zrcátky a jedním polopropustným členem. Vzhledem k velkému počtu optických prvků je seřízení celé optické soustavy velice náročné na přesnost a vyžaduje propracovaný postup.

Schéma principu osvětlovací soustavy mikroskopu je na obr. 5. Soustava je navržena tak, že obraz zdroje je promítán kolektorem do roviny mezičlenu obsahujícího aperturní clonku a dále polní čočkou do vstupní pupily objektivu¹ (červená čára). Aperturní clonka slouží k regulaci osvětlení v zorném poli. Rovina kolektoru je promítána aperturní čočkou mezičlenu do roviny Nipkowova disku a osvětlené otvory této roviny jsou dále promítány na povrch vzorku (modrá čára). Polní čočka přitom vymezuje zorné pole mikroskopu [7].

Na obr. 6 je zobrazena hlava konfokálního mikroskopu Confocal 2002 a uspořádání jednotlivých prvků. Paprsky procházející mezičlenem s aperturní clonkou jsou zrcátkem (9) odraženy a po průchodu polní čočkou (10) osvětlují rovinu Nipkowova disku (1).

¹Vstupní pupilou objektivu je zde a v celém následujícím textu nazývána tzv. zadní pupila objektivu, která se vzhledem k osvětlovací soustavě jeví jako pupila vstupní.



Obr. 5: Schéma osvětlovací soustavy konfokálního mikroskopu Confocal 2002.

Paprsky, které projdou otvory v disku, jsou dále odraženy zrcátkem (4), polopropustným členem (7) a dalším zrcátkem (8) a procházejí objektivem až k povrchu vzorku. Zde se paprsky odrážejí a putují zpět přes objektiv (2) a zrcátko (8) k polopropustnému členu (7), kterým procházejí a dalšími zrcátky (6 a 5) jsou směřovány přes Nipkowův disk (1) až do okuláru (3). Při druhém průchodu diskem jsou eliminovány paprsky přicházející z rozostřených rovin vzorku. Soustava optických členů 4–7 vytváří invertující systém, jehož úkolem je zajistit průchod paprsků odpovídajícími otvory na druhé straně disku.

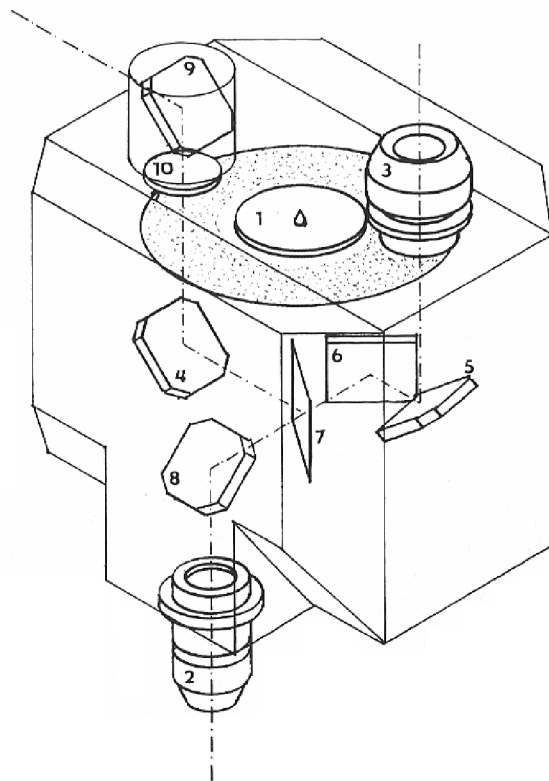
Osram HBO 200 W/2 TM L1	
Výkon	200 W
Napětí	47 V
Světelný tok	9500 lm
Svítivost	1000 cd
Průměrný jas	40000 cd/cm ²
Svítivá plocha	0,6 mm x 2,2 mm
Světelná účinnost	47,5 lm/W
Průměrná životnost	400 hod

Tab. 1: Parametry rtuťové výbojky Osram HBO 200 W/2 TM L1.

V osvětlovací soustavě je v současné době jako zdroj nekoherentního světla využívána vysokotlaká rtuťová výbojka s krátkým obloukem Osram HBO 200 W/2 TM L1. Parametry této výbojky jsou uvedeny v tab. 1. Protože světlo je z výbojky vyzařováno všemi směry a není dále usměrňováno žádným reflektorem, je využito pouze zlomek celkového světelného toku výbojky. Pokud provedeme zjednodušující úvahu a budeme výbojku považovat za svítící bod, můžeme přibližně určit množství světla, které projde kolektorem a může tedy být využito. Střed výboje je umístěn přibližně 30 mm od první plochy kolektoru o průměru 22 mm. Využit je tak pouze kužel světla s vrcholovým úhlem $2\alpha = 40,3^\circ$. To odpovídá prostorovému úhlu

$$\Omega = 2\pi \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[\cos^{-1}(\alpha) - 1 \right] = 2\pi \cdot \cos\left(\frac{40,3^\circ}{2}\right) \cdot \left[\cos^{-1}\left(\frac{40,3^\circ}{2}\right) - 1 \right] = 0,38 \text{ sr.} \quad (1)$$

Protože prostorový úhel celé koule je $\Omega_K = 4\pi$ sr, tvoří využitý kužel světla zhruba 3,1% prostorového úhlu koule, což odpovídá využitému světelnému toku 290 lm z původních



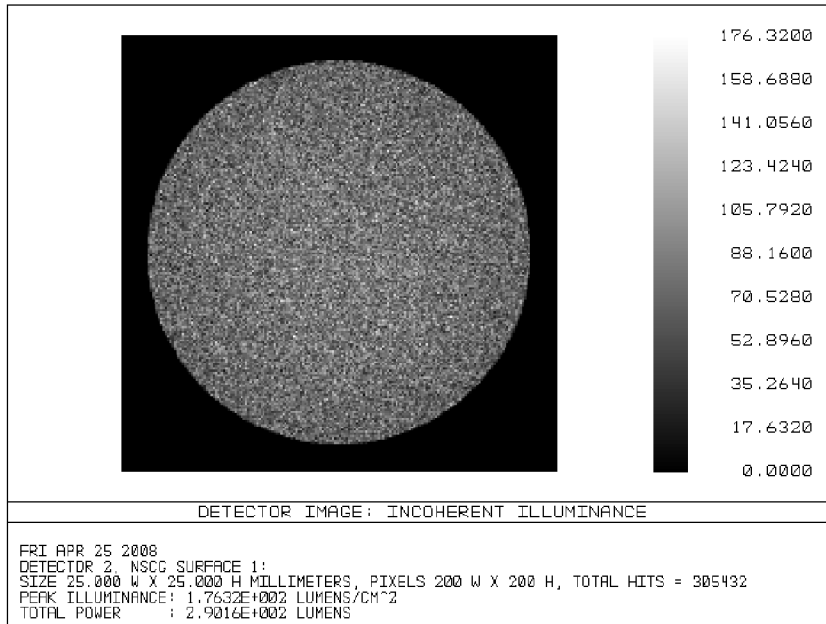
Obr. 6: Schéma hlavy konfokálního mikroskopu Confocal 2002. Popis jednotlivých prvků: 1 - Nipkowův disk, 2 - objektiv, 3 - okulár, 4, 5, 6, 8, 9 - zrcátka, 7 - polopropustný člen, 10 - polní čočka [2].

9500 lm výbojky (viz tab. 1).

Tento výpočet můžeme ověřit a zároveň zpřesnit pomocí nesequenčního módu systému ZEMAX (*Non-sequential mode*, viz [8], str. 289 a kap. 4.1). Výboj ve výbojce má přibližně tvar protáhlého rotačního elipsoidu. Ten nadefinujeme pomocí objektu *Source Volume Ellipse*, velikosti jeho poloos nastavíme na 0,3 mm x 1,1 mm x 0,3 mm a světelný tok 9500 lm (viz tab. 1). Tím získáme zjednodušený model naší výbojky s odpovídajícím výkonem vyzařovaným rovnoměrně do všech směrů od zdroje. Nyní umístíme do vzdálenosti 30 mm od zdroje kruhovou clonku (*Annulus*) o průměru 22 mm a ihned za ní detektor (*Detector Rect*) s takovými rozměry, aby byla pokryta celá plocha clonky (25 mm x 25 mm). Pokud nyní spustíme trasování paprsků, vypočte ZEMAX osvětlení v detekované rovině. Z analýzy vyplývá dobrá shoda s naším výpočtem, neboť výpočet ZEMAXu udává dopadající světelný tok 290 lm (viz řádek *TOTAL POWER* na obr. 7). Při analýze bylo trasováno 10^7 paprsků při rozlišení detektoru 200 px x 200 px.

3.1 Měření parametrů optických prvků mikroskopu

Pro další analýzy systému v prostředí ZEMAX bylo nutné znát parametry některých optických členů mikroskopu. Jelikož již k mikroskopu neexistuje žádná dostupná technická dokumentace, bylo jediným možným řešením získání těchto parametrů pomocí měření.



Obr. 7: Analýza osvětlení kolektoru výbojkou v systému ZEMAX.

Pro tato měření jsme použili optickou lavici, autokolimátor, posuvné měřítko a sférometr CONVEX.

Nejprve jsme pomocí posuvného měřítka změřili tloušťky a průměry jednotlivých čoček. Dále jsme pomocí sférometru určili poloměry křivosti jednotlivých lámavých ploch. Sférometr udává pouze hodnotu výšky vrchlíku, pro poloměr lámavé plochy potom platí

$$R = \frac{\rho^2 + h^2}{2h}, \quad (2)$$

kde R je poloměr křivosti plochy, ρ je poloměr podstavy vrchlíku a h je výška vrchlíku (obr. 8a). Posledním krokem bylo měření sečné ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček pro zjištění indexu lomu skla. To bylo prováděno na optické lavici za pomoci autokolimátoru a stínítka. Čočku jsme upevnili na optickou lavici a osvětili rovinnou vlnou. Tu jsme získali pomocí autokolimátoru nastaveného na nekonečno. Obraz osvětleného kříže se tak zobrazil v ohniskové rovině čočky. Postupným posuvem stínítka za stálého pozorování okem jsme co nejpřesněji stanovili polohu ohniska čočky porovnáváním ostrosti obrazu na stínítku. Změření vzdálenosti stínítka od první plochy bylo provedeno opět pomocí posuvného měřítka. Přesnost této metody při pozorování obrazu pouhým okem je nízká (± 1 mm), avšak pro naše účely, tedy pro určení typu skla čočky, se ukázala jako dostačující. Pro zobrazení lomem na kulové ploše platí v paraxiálním prostoru zobrazovací rovnice ([9], str. 52)

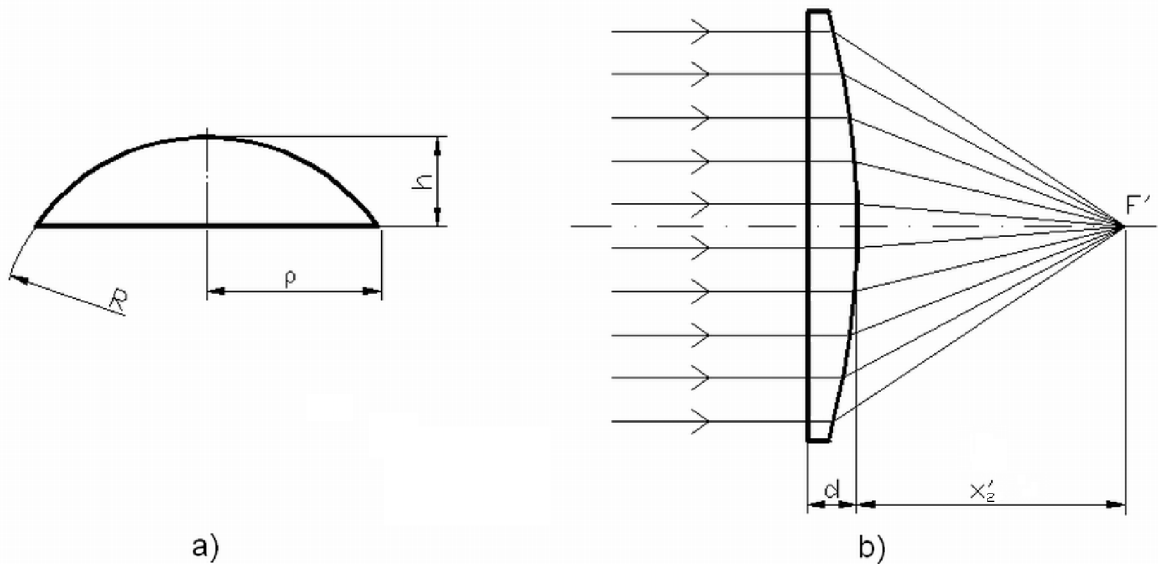
$$\frac{n'}{x'} - \frac{n}{x} = \frac{n' - n}{R}, \quad (3)$$

kde n, n' jsou indexy lomu, x, x' jsou vzdálenosti předmětu a obrazu a R je poloměr křivosti lámavé plochy. Pro index lomu potom díky jednoduché plankonvexní geometrii

všech měřených čoček platí vztah

$$n = 1 - \frac{R}{x'_2}, \quad (4)$$

kde n je hledaný index lomu skla, R je poloměr křivosti plochy a x'_2 je sečná ohnisková vzdálenost (obr. 8b).



Obr. 8: a) Měření poloměru lámavé plochy, b) měření sečné ohniskové vzdálenosti čočky.

Po demontáži kolektoru a členu aperturní čočky bylo zjištěno, že tyto členy jsou tvořeny vždy dvěma stejnými plankonvexními čočkami. Vzhledem k tomu, že mikroskop je v laboratoři stále využíván pro různá pozorování, nebylo možné demontovat třetí člen, tedy polní čočku.

Kolektor sestává z dvou plankonvexních čoček obrácených rovinnou plochou směrem ke zdroji. Naměřené a vypočtené parametry čoček jsou v tab. 2. Protože se čočky nachází v bezprostřední blízkosti výkonné výbojky, předpokládali jsme, že jsou vyrobeny z křemenného skla ($n_d^{SiO_2} = 1,458$), které dobře snáší vysoké teploty. Výpočty udávají hodnoty indexu lomu blízké hodnotám křemenného skla, a proto jsme dále tento předpoklad považovali za správný. Hodnotu poloměru křivosti obou čoček jsme pro další analýzy na základě výsledků měření v tab. 2 stanovili na $R = 26$ mm. Výsledné schéma kolektoru je na obr. 9a.

Aperturní člen je tvořen dvěma plankonvexními čočkami otočenými k sobě svými vypuklými stranami. U těchto čoček jsme předpokládali obvyklý a nejčastěji využívaný optický materiál, borité korunové sklo BK7 ($n_d^{BK7} = 1,517$). Z výsledků výpočtů usuzujeme, že i tento náš předpoklad byl správný (tab. 3). Mezi čočkami je umístěna aperturní clonka regulující osvětlení v zorném poli. Celý člen je možné posouvat po optické ose pro přesné seřízení polohy clonky. Hodnotu poloměru křivosti obou čoček jsme pro další analýzy na základě výsledků měření v tab. 3 stanovili na $R = 68,5$ mm. Výsledné schéma členu aperturní čočky je na obr. 9b.

Člen polní čočky je zatmelený v objímce a nebylo tedy možné jednotlivé čočky bez poškození vyjmout a proměřit. Získali jsme tak pouze informace o první a poslední ploše tohoto prvku. Měřením pomocí sférometru jsme určili, že tyto plochy jsou rovinné. Z toho lze usuzovat, že člen polní čočky je složen obdobně jako aperturní člen, tedy ze dvou plankonvexních čoček otočených k sobě svými vypuklými stranami. Dále jsme změřili vzdálenost dvou rovinných ploch vůči sobě. Pokud tento člen v ZEMAXu nasmulujeme pomocí stejných čoček, ze kterých je složen člen aperturní čočky, získáme soustavu vytvářející obraz zdroje přibližně 160 mm za rovinou Nipkowova disku. To odpovídá požadavkům popsáním v kap. 3, tedy že obraz zdroje je zobrazován do vstupní pupily objektivu. Přitom celý systém je citlivý na umístění zdroje vzhledem ke kolektoru a již při malé změně polohy zdroje se poloha jeho obrazu nezanedbatelně mění (osové zvětšení $\alpha \sim 10$).

Schémata všech měřených členů a celé soustavy jsou na obr. 9. Z obrázku je patrné, že je zachována funkce osvětlovací soustavy tak, jak byla popsána v kap. 3, tedy zdroj je zobrazován do roviny aperturní clonky a vstupní pupily objektivu a rovina kolektoru je zobrazována do roviny Nipkowova disku a vzorku. Zdrojová data celé optické soustavy tak, jak byla dále zadávána při analýzách v systému ZEMAX, jsou uvedena v tab. 4.

<i>Měření</i>	Čočka 1	Čočka 2
Efektivní průměr ϕ [mm]	$22,0 \pm 0,1$	$22,0 \pm 0,1$
Tloušťka d [mm]	$5,0 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$
Výška vrchlíku h [mm]	$0,715 \pm 0,005$	$0,710 \pm 0,005$
Sečná ohnisková vzdálenost x'_2 [mm]	$53,8 \pm 1,0$	$54,5 \pm 1,0$
Vzdálenost čoček Δ [mm]	$0,6 \pm 0,1$	
<i>Výpočet</i>		
Poloměr lámavé plochy R [mm]	$26,0 \pm 0,9$	$26,1 \pm 0,9$
Index lomu skla n [-]	$1,48 \pm 0,02$	$1,48 \pm 0,02$

Tab. 2: Naměřené a vypočtené parametry čoček kolektoru.

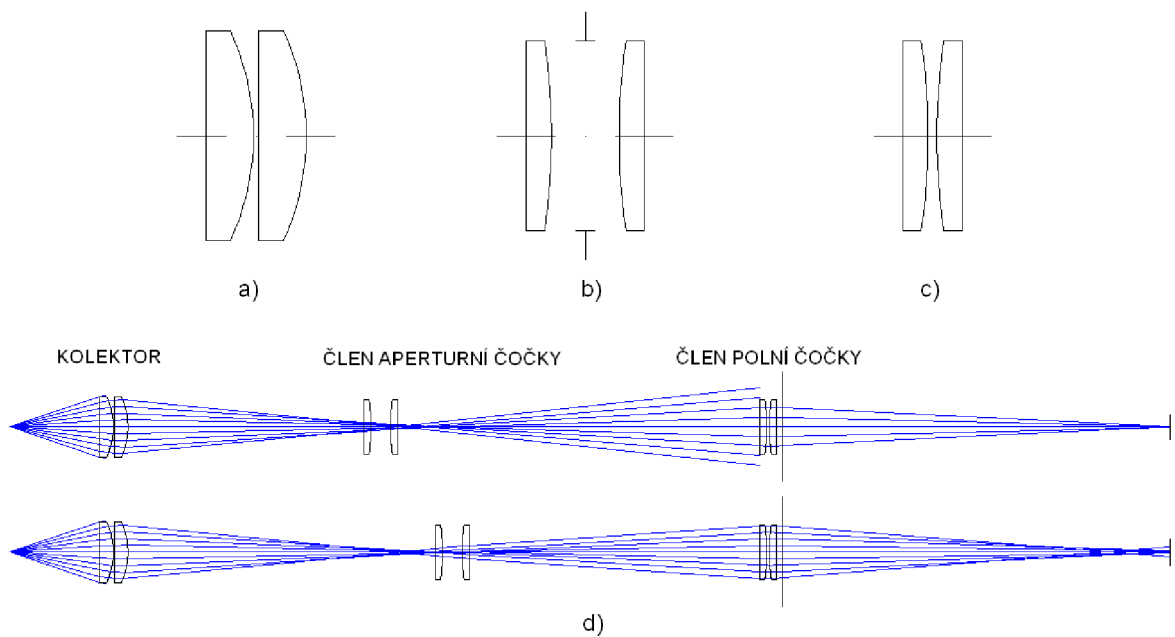
<i>Měření</i>	Čočka 1	Čočka 2
Efektivní průměr ϕ [mm]	$20,0 \pm 0,1$	$20,0 \pm 0,1$
Tloušťka d [mm]	$2,7 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$
Výška vrchlíku h [mm]	$0,270 \pm 0,005$	$0,265 \pm 0,005$
Sečná ohnisková vzdálenost x'_2 [mm]	$133,5 \pm 1,0$	$133,5 \pm 1,0$
Vzdálenost čoček Δ [mm]	$7,1 \pm 0,1$	
<i>Výpočet</i>		
Poloměr lámavé plochy R [mm]	68 ± 3	69 ± 3
Index lomu skla n [-]	$1,51 \pm 0,02$	$1,52 \pm 0,02$

Tab. 3: Naměřené a vypočtené parametry čoček aperturního členu.

Název vrstvy	Surf:Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
Zdroj	Standard	Infinity	30,0		0,0
Kolektor 1	Standard	Infinity	5,0	SILICA	11,0
	Standard	-26,0	0,6		11,0
Kolektor 2	Standard	Infinity	5,0	SILICA	11,0
	Standard	-26,0	86,0 (112,0)*		11,0
Aperturní čočka 1	Standard	Infinity	2,7	BK7	10,0
	Standard	-68,5	7,1		10,0
Aperturní čočka 2	Standard	68,5	2,7	BK7	10,0
	Standard	Infinity	132,0 (106,0)*		10,0
Polní čočka 1	Standard	Infinity	2,7	BK7	10,0
	Standard	-68,5	0,9		10,0
Polní čočka 2	Standard	68,5	2,7	BK7	10,0
	Standard	Infinity	2,3		10,0
Nipkowův disk	Standard	Infinity			

Tab. 4: Zdrojová data osvětlovací soustavy používaná při analýzách v systému ZEMAX.

* V závorce jsou uvedeny rozměry pro druhou krajní polohu členu aperturní čočky.



Obr. 9: Schéma a) kolektoru, b) členu aperturní čočky, c) členu polní čočky a d) zobrazení osového bodu zdroje osvětlovací soustavou se členem aperturní čočky umístěným v obou krajních polohách (ZEMAX).

4 Analýza soustavy v systému ZEMAX

Parametry optických prvků mikroskopu jsme získali z měření popsaného v kapitole 3.1 (viz tab. 4). V této kapitole provedeme analýzu světelného toku a osvětlení v různých částech optické soustavy mikroskopu. K tomu využijeme nesequenčního módu systému ZEMAX ([8], str. 289). Údaje z této analýzy budou dále využity pro porovnání při návrzích nové osvětlovací soustavy (kap. 5).

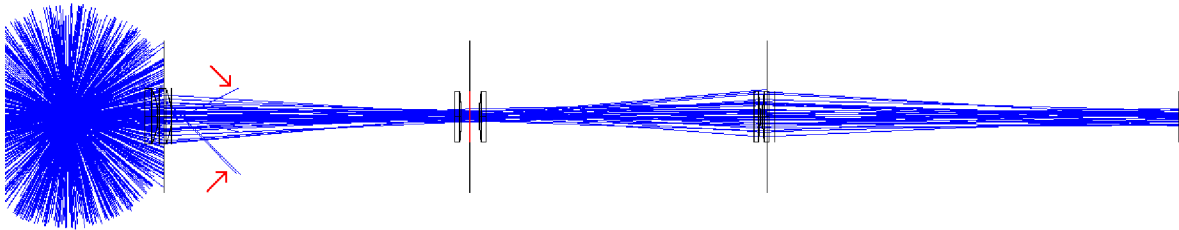
4.1 Nesequenční mód systému ZEMAX

Nesequenční mód systému ZEMAX (*Non-sequential mode*) je určen především pro výpočty fotometrických vlastností optických systémů. Je tedy vhodný pro řešení našeho problému. V sequenčním módu jsou paprsky trasovány postupně od jednoho povrchu k druhému v takovém pořadí, jak jsou tyto povrchy zadány. Většina optických prvků však nemůže být pomocí povrchů dostatečně popsána. Například jednoduchá čočka není tvořena pouze předním a zadním povrchem, ale má také fazety a hrany. V nesequenčním módu mohou paprsky procházet objekty (*Non-sequential component*) v libovolném pořadí (i opakovaně), případně mohou objekty minout. Práce v tomto módu spíše připomíná práci v 3D CAD programu, kde do prostoru umísťujeme jednotlivé objekty. Tyto objekty mohou mít libovolné tvary a jejich povrchy rozdílné vlastnosti. Prostorem a jednotlivými objekty jsou potom trasovány paprsky nesoucí určité množství energie a po dopadu na detektor je tato energie detekována. Paprsky mohou být objekty absorbovány, propouštěny či odráženy, nebo také rozptylovány. Přesnost analýz v tomto módu je závislá na množství protrasovaných paprsků. Se zvyšujícím se počtem paprsků přesnost výpočtu roste, avšak také výrazně stoupá doba výpočtu. Proto je nutné zvolit vhodné minimální množství paprsků pro požadovanou přesnost. Nesequenční mód systému ZEMAX a jeho ovládání je podrobněji popsáno v manuálu k programu ([8], str. 289).

4.2 Analýza osvětlení a světelného toku v systému ZEMAX

Nyní zadáme soustavu v nesequenčním módu systému ZEMAX a provedeme analýzu světelného toku a osvětlení v jednotlivých rovinách soustavy. Nejprve opět nadefinujeme zdroj světla - výbojku - pomocí objektu *Source Volume Ellipse*, velikosti jeho poloos nastavíme na 0,3 mm x 1,1 mm x 0,3 mm a světelný tok 9500 lm (viz tab. 1). Dále podle tab. 4 nadefinujeme jednotlivé čočky optické soustavy pomocí objektů *Standard Lens*. Vytvoříme aperturní clonku ve členu aperturní čočky pomocí objektu *Annulus* a pomocí stejného objektu vytvoříme také clony kolem druhé čočky kolektoru, členu polní čočky a v rovině vstupní pupily objektivu. Tak zabráníme dalšímu šíření paprsků neprocházejících soustavou. Dále je třeba nadefinovat v ZEMAXu správně úbytek světla na Nipkowově disku (propouští 1%, viz 1 na obr. 6) a polopropustném členu (propouští 50%, viz 7 na obr. 6). K tomu využijeme například válcový objekt *Cylinder Volume*, který umístíme mezi disk a rovinu vstupní pupily objektivu. Na jeho přední straně zadáme vrstvu (*Coating*) I.01 a na zadní vrstvu I.50. Protože vrstva I.01 s propustností 1% v ZEMAXu není standardně definována, je zapotřebí tuto vrstvu vytvořit v souboru "COATING.DAT". Takto jsme vytvořili filtr s propustností 1% na přední straně a 50% na

zadní straně. Ještě zbývá nadefinovat detektory osvětlení ve všech zkoumaných rovinách. K tomu využijeme komponentu *Detector Rect.* Detektory umístíme za člen kolektoru, do roviny aperturní clonky, Nipkowova disku a také do roviny vstupní pupily objektivu. Takto nadefinovaná soustava je zobrazena na obr. 10. Již z obrázku je patrné, že systém využívá velice malé množství světla z celkového světelného toku výbojky.

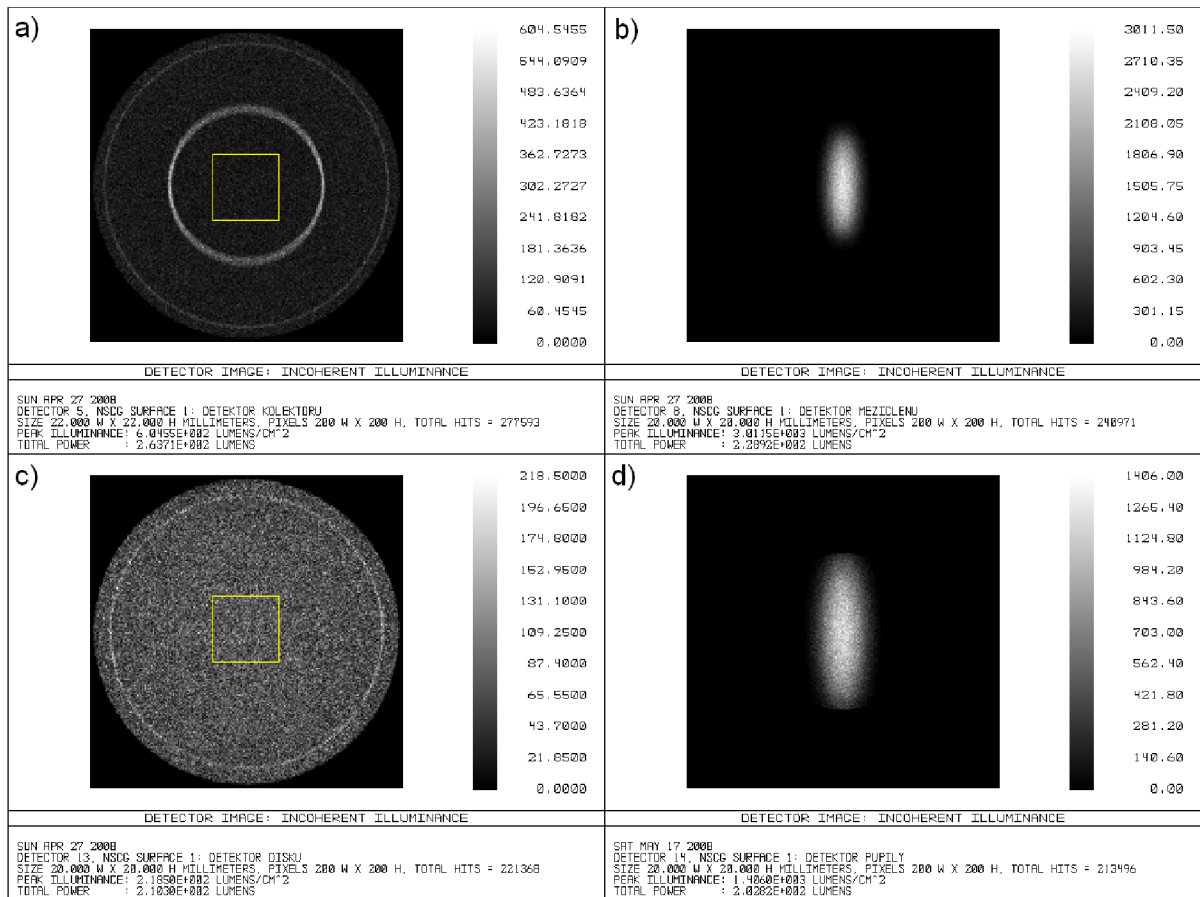


Obr. 10: Sestava s výbojkou v nesequenčním módu systému ZEMAX. Šipky označují paprsky odražené od hran kolektoru.

Před zahájením výpočtu je nutné zaškrtnout volbu *Split Rays* v okně *Detector Control*. Tak zapneme rozdělování paprsků na definovaných vrstvách. Výpočet spustíme pomocí příkazu *Trace*. Po dokončení výpočtu jsou data zobrazena v okně *Detector Viewer* (obr. 11). Již při trasování 10^5 paprsků je však výpočet s využitím rozdělování paprsků velice pomalý (cca 4 min na procesoru 2,2 GHz) a přitom nepřesný. Pro dostatečnou přesnost (± 1 lm) je zapotřebí zvolit alespoň o jeden řád vyšší počet paprsků, v takovém případě ovšem výpočet trvá více než 40 min. Proto se spokojíme s analýzou systému bez rozdělování paprsků, tj. bez nadefinovaného filtru, a budeme dále předpokládat množství světla dopadajícího do vstupní pupily objektivu jako 0,5% hodnoty udávané výpočtem. Níže analyzovaný výpočet byl prováděn trasováním 10^7 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px.

Na obr. 11a je zobrazen průběh osvětlení v rovině za kolektorem. Z analýzy vyplývá, že kolektorem prochází světelný tok 264 lm, tedy méně světla, než bylo stanoveno předběžným výpočtem v kap. 3 (290 lm). Je to způsobeno tím, že v kap. 3 jsme určovali množství světla dopadající do rovinné plochy první čočky kolektoru. Kolektor je však tvořen dvěma reálnými čočkami vzdálenými od sebe 0,6 mm a část světla se tedy ztrácí. Maximální osvětlení dosahuje hodnoty 605 lm/cm^2 . Avšak na obrázku jsou patrné dva prstence se zvýšenou hodnotou osvětlení. Tyto prstence jsou vytvořeny odrazem paprsků od hran čoček, které však ve skutečnosti světlo neodrážejí. Přitom menší a výraznější prstenec je tvořen odrazem od hrany první čočky kolektoru a slabší prstenec odrazem od hrany druhé čočky kolektoru. Paprsky takto odražené procházejí vůči ostatním paprskům pod větším úhlem vzhledem k optické ose a nejsou tedy soustavou dále využity (na obr. 10 jsou označeny červenými šipkami). Bez těchto prstenců je pole detektoru osvětleno rovnoměrně. Hodnotu osvětlení pak můžeme vypočítat zprůměrováním hodnot části detektoru označené žlutým čtvercem o rozměrech 45 px x 45 px. Výpočtem tak získáme průměrnou hodnotu osvětlení 59 lm/cm^2 . Výpočet byl prováděn pomocí programu *Výpočty ZEMAX* vyvinutého v programovacím prostředí Delphi (viz Přílohy).

Na obr. 11b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. Z analýzy vyplývá, že členem aperturní čočky prochází světelný tok 229 lm. Maximální hodnota



Obr. 11: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy: a) rovina za kolektorem, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu. Žluté čtverce označují oblasti, z nichž byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

osvětlení činí 3012 lm/cm^2 . Na detektoru je patrné, že je v této rovině vytvářen obraz výboje. Změnou průměru aperturní clonky tedy vybíráme část obrazu výboje, která bude dále osvětlovat vzorek. Dále je vidět, že kolektor vytváří obraz výboje o velikosti zhruba $1,8 \text{ mm} \times 6,6 \text{ mm}$, tedy se zvětšením $\beta_K \sim -3$. Tato hodnota je však pouze přibližná, protože obraz je ovlivněn také průchodem paprsků první čočkou členu aperturní čočky a nevypovídá tedy pouze o vlastnostech kolektoru.

Na obr. 11c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Z analýzy vyplývá, že do roviny disku dopadá světelný tok 210 lm . Osvětlení je rovnoměrné, avšak stejně jako v případě kolektoru i zde vzniká odrazem od hran polní čočky prstenec s vyšší hodnotou osvětlení. Pokud opět zprůměrujeme hodnoty ze středu pole detektoru označené žlutým čtvercem, získáme průměrnou hodnotu osvětlení 76 lm/cm^2 .

Na obr. 11d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Z analýzy vyplývá, že touto rovinou protéká světelný tok 203 lm a maximální osvětlení dosahuje hodnoty 1406 lm/cm^2 . Ve skutečnosti však Nipkowův disk propouští zhruba 1% světla a další úbytek světla (50%) je způsoben polopropustným členem. Proto ve skutečnosti do roviny vstupní pupily objektivu dopadá zhruba 1 lm světelného toku vytvářející

maximální hodnotu osvětlení ve středu detektoru 7 lm/cm^2 . I na tomto detektoru je patrný obraz výbojky, jeho rozměry jsou zhruba $2,7 \text{ mm} \times 9,9 \text{ mm}$, člen polní čočky má tedy zvětšení $\beta_{PC} \sim -1,5$. Tato hodnota je opět pouze přibližná.

Protože světlo dále prochází objektivem, bude k dalším ztrátám docházet také v tomto členu optické soustavy. Rozměry obrazu výbojky v rovině vstupní pupily jsou poměrně velké a většina objektivů tedy nevyužije celý světelný tok dopadající do této roviny.

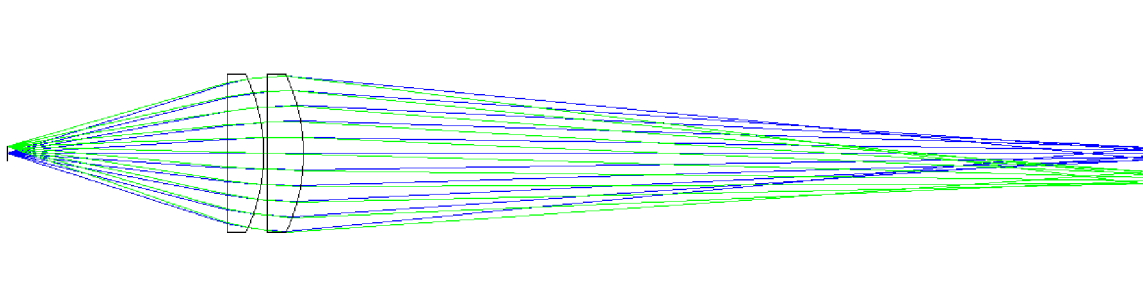
Srovnání vypočtených hodnot světelného toku a osvětlení v jednotlivých rovinách soustavy uvádí tab. 5. Jak bude uvedeno dále v kap. 6.2, tento model s centrovaným výbojem je výrazně vzdálený parametrům skutečné soustavy.

Rovina	Světelný tok [lm]	Maximální osvětlení [lm/cm^2]
Zdroj	9500	-
Kolektor	264	59
Aperturní clonka	229	3012
Nipkowův disk	210	76
Vstupní pupila objektivu	1	7

Tab. 5: Srovnání hodnot světelného toku a osvětlení v jednotlivých rovinách soustavy.

4.3 Analýza obrazu v rovině aperturní čočky

Při návrhu nové osvětlovací soustavy vyjdeme ze stávajícího návrhu. Část soustavy bude zachována a nahrazen bude pouze člen kolektoru (viz kap. 5), proto provedeme ještě analýzu požadavků na paprsky vstupující do členu aperturní čočky. Pro budoucí návrh bude důležité znát především velikost obrazu zdroje v rovině aperturní clonky a také vrcholový úhel kužele světla, který tento obraz vytváří. Obraz zdroje by měl mít menší rozměry, než je maximální průměr aperturní clonky. Vrcholový úhel kužele světla by měl být takový, aby bylo dále v soustavě využito všechno dopadající světlo. Oba tyto parametry jsou určeny právě vlastnostmi kolektoru a polohou zdroje vůči němu. Proto v sekvenčním módu systému ZEMAX nadefinujeme člen kolektoru (obr. 12) a budeme analyzovat jeho vlastnosti.



Obr. 12: Člen kolektoru zadaný v systému ZEMAX. Zelené paprsky odpovídají krajnímu bodu výboje.

Z analýzy vyplývá, že ohnisková vzdálenost kolektoru je $f'_K = 29,4 \text{ mm}$, obraz zdroje

je vytvořen ve vzdálenosti $a' = 117,5$ mm za poslední lámavou plochou kolektoru. Para-
xiální příčné zvětšení má hodnotu $\beta_K = -4,3$. Velikost obrazu výbojky je tedy zhruba
9,4 mm x 2,6 mm. Pomocí parametru RANG v *Merit Function Editor* zjistíme, že vrcho-
lový úhel kužele světla procházejícího aperturní clonkou je $2\alpha' = 6,1^\circ$. Kvalita zobrazení
není vysoká, to však není u osvětlovacího systému hlavní prioritou.

5 Návrh osvětlovací soustavy

Pro následující návrhy osvětlovací soustavy nyní vybereme vhodný zdroj. Vlastnosti halogenových žárovek i LED diod byly podrobně popsány v kap. 2.3. Halogenové žárovky nedosahují světelného toku výbojek, rozměry jejich vláknů jsou přitom výrazně větší. Nevýhodnou vlastností z konstrukčního hlediska jsou také celkové rozměry halogenové žárovky. Ani LED diody nedosahují světelného toku výbojek, avšak mají konstrukčně přijatelnější rozměry a velikost jejich čipu je přitom srovnatelná s velikostí výboje ve výbojce. Proto pro návrh osvětlovací soustavy zvolíme jako zdroj LED diodu.

V následujících kapitolách tedy nahradíme kolektorový člen osvětlovací soustavy novými prvky navrženými pro LED diodu. Budeme při tom vycházet z poznatků a naměřených a vypočtených hodnot z předchozích kapitol (3 a 4). Hlavním požadavkem bude vytvoření obrazu zdroje v rovině vstupní pupily objektivu mikroskopu takové velikosti, aby většina světla touto pupilou prošla. Protože u většiny mikroobjektivů je průměr vstupní pupily $D_{VP} < 10$ mm, budeme požadovat obraz zdroje těchto rozměrů. Zároveň musí být osvětleno celé zorné pole tak, aby v rovině polní čočky docházelo k co nejmenším ztrátám světla.

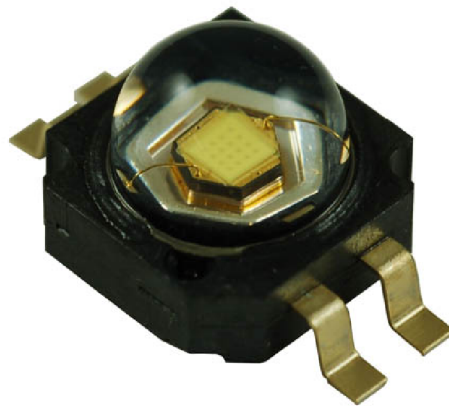
5.1 Výběr vhodné LED diody

Při návrzích nové osvětlovací soustavy je třeba brát v úvahu vlastnosti konkrétního zdroje světla, pro který soustavu navrhujeme. Hlavními požadavky při výběru LED diody byly: maximální výkon, minimální vyzařovací úhel, malé rozměry čipu a široké spektrum. Co největší výkon je u konfokálního mikroskopu nutný pro dostatečné osvětlení vzorku. Co nejmenší vyzařovací úhel je podstatný pro efektivní využití světla v soustavě. Obraz čipu bude kolektorem přenášen do roviny vstupní pupily objektivu a je nutné, aby tento obraz byl menší než průměr pupily. Malé rozměry čipu budou proto vhodné. Široké spektrum je důležité pro pozorování vzorku ve všech barvách. Protože výkonné diody mají srovnatelné rozměry čipů a velikosti vyzařovacích úhlů, zaměřili jsme se při výběru LED diody především na hodnoty světelného toku. Uvedené požadavky nejlépe splňuje v současné době nejvýkonnější bíle zářící LED dioda Philips LUXEON K2 TFFC s označením L XK2-PWC4-0200 (obr. 13). Parametry této diody jsou uvedeny v tab. 6, vyzařovací diagram je na obr. 14.

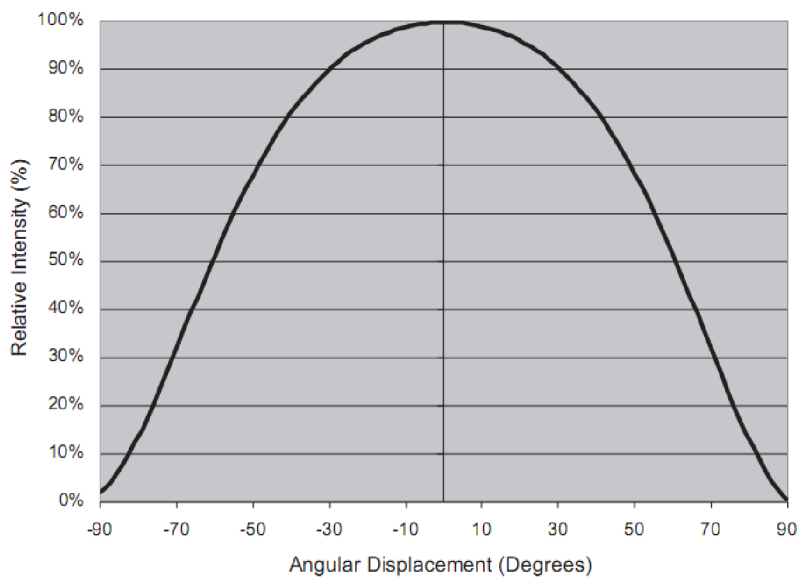
Philips L XK2-PWC4-0200	
Pracovní proud	1500 mA
Napětí v propustném směru	3,85 V
Světelný tok	275 lm
Barevný rozsah	4500 - 10000 K
Vyzařovací úhel	160°
Maximální provozní teplota	150°C
Rozměry čipu	1,8 mm x 1,8 mm

Tab. 6: Parametry diody Philips L XK2-PWC4-0200 [11].

Jak je patrné, oproti výbojce má dioda podstatně menší hodnotu světelného toku (275 lm, tj. 2,9% světelného toku výbojky). V kap. 4.2 jsme určili, že prvním členem



Obr. 13: LED dioda Philips LUXEON K2 TFFC [10].



Obr. 14: Vyzařovací diagram diody Philips LXX2-PWC4-0200 [11].

optické soustavy, tj. kolektorem, prochází světelný tok 264 lm. Proto při využití většiny světelného toku LED diody (95%) bude množství světla dostatečné. Rozměry čipu diody jsou srovnatelné s velikostí oblouku ve výbojce. Čočka diody je vyrobena z měkkého plastu a mezi čočkou a čipem je silikonová náplň. Optické vlastnosti těchto materiálů neznáme, a proto můžeme v ZEMAXu vytvořit pouze zjednodušený model diody. K tomu využijeme objekt *Source Radial*, který lze nastavit pro daný vyzařovací diagram. Jeho rozměry nastavíme tedy na 1,8 mm x 1,8 mm a světelný tok 275 lm (viz tab. 6). Z vyzařovacího diagramu diody (obr. 14) odečteme hodnoty a zadáme do ZEMAXu. Použité hodnoty jsou v tab. 7. Při dalších analýzách bude také důležité znát funkci popisující křivku vyzařovacího diagramu. Tu zjistíme pomocí kubického splinu v programu Maple. Funkce popisující křivku v jednotlivých intervalech jsou na obr. 15. Numerickou integrací

této křivky popsané funkcemi kubického splinu v mezích od -90° do 90° dostaneme číselnou hodnotu obsahu plochy pod křivkou $S = 11658$. Tuto hodnotu využijeme při následujících návrzích pro odvození parametrů prvků osvětlovací soustavy. Při výpočtu byla použita obdélníková metoda s počtem kroků 10^3 , výpočet byl realizován pomocí programu *Integrace* vyvinutého v programovacím prostředí Delphi (viz Přílohy).

Úhel vyzařování [°]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Relativní intenzita [%]	100	99	96	91	82	68	51	32	13	0

Tab. 7: Hodnoty vyzařovacího diagramu použité při analýzách v systému ZEMAX.

$$\begin{aligned}
 & 100 - \frac{2242}{40545}x - \frac{29}{64872}x^3 && x < 10 \\
 & \frac{268456}{2703} + \frac{6056}{40545}x - \frac{461}{22525}x^2 + \frac{1907}{8109000}x^3 && x < 20 \\
 & \frac{284216}{2703} - \frac{29404}{40545}x + \frac{524}{22525}x^2 - \frac{4003}{8109000}x^3 && x < 30 \\
 & \frac{15718}{159} - \frac{3889}{40545}x + \frac{103}{45050}x^2 - \frac{2113}{8109000}x^3 && x < 40 \\
 & \frac{43138}{901} + \frac{151127}{40545}x - \frac{4203}{45050}x^2 + \frac{41}{76500}x^3 && x < 50 \\
 & \frac{271039}{2703} + \frac{893}{1530}x - \frac{2741}{90100}x^2 + \frac{947}{8109000}x^3 && x < 60 \\
 & \frac{341023}{2703} - \frac{3391}{4770}x - \frac{797}{90100}x^2 - \frac{1}{324360}x^3 && x < 70 \\
 & -\frac{1419253}{2703} + \frac{441113}{16218}x - \frac{36721}{90100}x^2 + \frac{15371}{8109000}x^3 && x < 80 \\
 & \frac{1129817}{901} - \frac{3204227}{81090}x + \frac{7683}{18020}x^2 - \frac{2561}{1621800}x^3 && otherwise
 \end{aligned}$$

Obr. 15: Kubický spline vyzařovacího diagramu diody Philips LUXEON K2 v programu Maple.

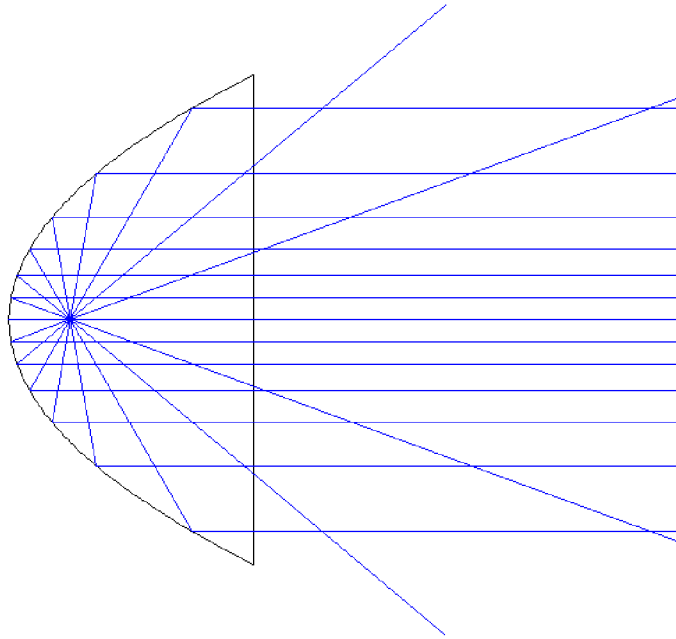
5.2 Návrh s využitím parabolického zrcadla

Při prvním návrhu osvětlovací soustavy bylo využito parabolického zrcadla. Rotační paraboloid je popsán rovnicí

$$z = ar^2, \tag{5}$$

kde z je souřadnice podél optické osy paraboloidu, r je vzdálenost od optické osy a a je konstanta. Pokud je bodový zdroj umístěný v ohnisku zrcadla, potom jsou odražené paprsky jdoucí z tohoto bodu rovnoběžné s optickou osou a vytvářejí kolimovaný svazek (obr. 16). Toto však platí pouze pro body ležící v ohnisku na optické ose, ostatní body kolimovaný svazek nevytvářejí. Rozměry čipu diody jsou poměrně malé a pokud tedy

do ohniska umístíme diodu, vytvoříme přibližně rovnoběžný svazek paprsků, které dále můžeme fokusovat přiloženou čočkou do roviny aperturní clonky.



Obr. 16: Zobrazení bodového zdroje parabolickým zrcadlem.

Při zobrazování parabolickým zrcadlem však není všechno světlo odráženo od zrcadla, ale část světla uniká ven a nemůže být dále v soustavě využita. Tyto paprsky vytvářejí kužel světla, jehož vrcholový úhel 2α (obr. 17), a tedy množství unikajícího světla, je ovlivněno rozměry paraboloidu. Přitom čím protáhlejší je paraboloid, tím menší je vrcholový úhel kužele 2α a tím více světla je tedy odráženo na zrcadle a dále využito v soustavě.

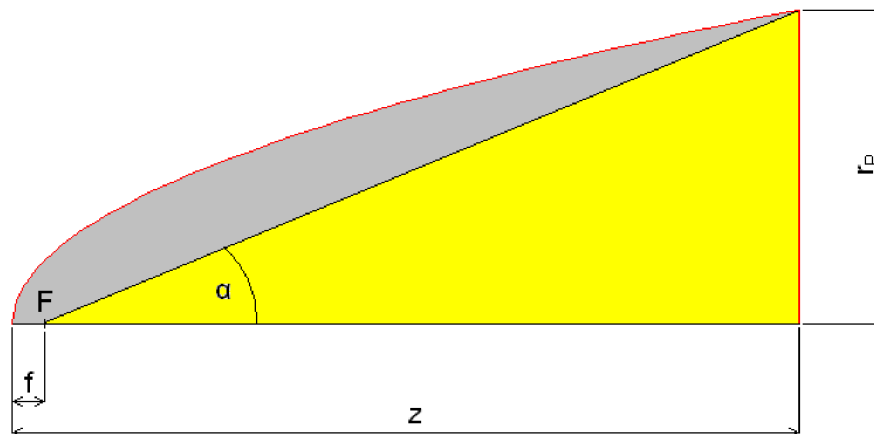
Parabolické zrcadlo budeme navrhovat s výstupním průměrem $D_P = 20$ mm (tj. $r_P = 10$ mm), tj. se stejným průměrem, jaký mají ostatní čočky osvětlovací soustavy mikroskopu, a budeme sledovat množství ztrátového světla závislé na konstantě a . Pro polohu ohniska zrcadla platí

$$f = \frac{1}{4a}, \quad (6)$$

kde f je ohnisková vzdálenost a a je konstanta. Pokud zdroj považujeme za bodový, platí podle obr. 17 pro úhel α vztah

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r_P}{z - f}\right) = \arctan\left(\frac{r_P}{ar_P^2 - \frac{1}{4a}}\right). \quad (7)$$

Pokud známe úhly α odpovídající jednotlivým hodnotám konstanty a , můžeme provést numerickou integraci vyzařovací křivky diody (obr. 14) v daném rozsahu úhlů α . Takto zjistíme poměr množství ztrátového světla vůči celkovému světelnému toku diody. Výpočet byl prováděn pro 9 hodnot v rozsahu $a = (0,05 \div 12,8)$ mm⁻¹ (viz tab. 8). Protože potřebujeme využít alespoň 95% světelného toku diody (viz kap. 5.1), stanovíme kritérium pro maximální přípustné ztráty 5%. Použitím mocninné regrese (obr. 18)



Obr. 17: K výpočtu ztrátového světla parabolického zrcadla.

dostaneme závislost podílu ztrátového světla na konstantě a jako mocninnou funkci

$$y = 0,0081 \cdot a^{-1,8376} \quad (8)$$

Pro požadavek 5% ztrátového světla tedy dostáváme hodnotu konstanty $a = 0,37 \text{ mm}^{-1}$. Této hodnotě v ZEMAXu odpovídají parametry Radius:

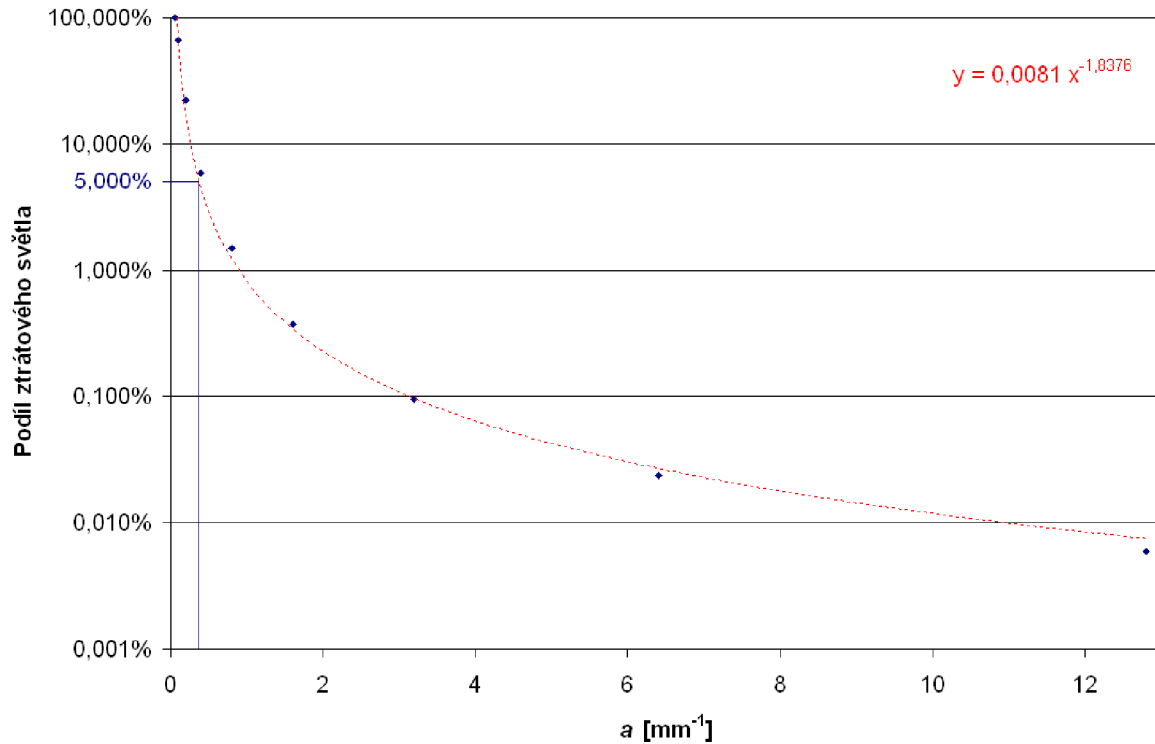
$$R = \frac{1}{2a} = \frac{1}{2 \cdot 0,37} = 1,346 \text{ mm} \quad (9)$$

a Conic: -1 ([8], str. 270).

Konstanta a [mm^{-1}]	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8
Úhel α [$^\circ$]	90	53,1	28,1	14,3	7,2	3,6	1,8	0,9	0,4
Hodnota integrálu S	11658,1	9475,4	5466,9	2829,7	1427,1	715,2	357,9	179,0	89,5
Podíl ztrátového světla [%]	100,00	66,06	21,99	5,89	1,50	0,38	0,09	0,02	0,01

Tab. 8: Výpočet podílu ztrátového světla v závislosti na konstantě a .

Hodnoty vypočtené v předchozím odstavci můžeme ověřit v systému ZEMAX. V programu nadefinujeme bodový zdroj podle tab. 7 pomocí objektu *Source Radial* a jeho světelný tok nastavíme na 100 lm (hodnotu ztrátového světla tak budeme na detektoru odečítat rovnou v procentech). Poté nadefinujeme parabolické zrcadlo podle vypočtených hodnot pomocí objektu *Standard Surface* a v kolonce **Material** zadáme hodnotu **ABSORB**. Všechny paprsky, které dopadnou na zrcadlo, budou absorbovány a na detektor tedy projdou pouze ztrátové paprsky. Za zrcadlo umístíme detektor (*Detector Rect*). Pokud provedeme trasování, dostaneme výslednou hodnotu světelného toku 6,9 lm. Oproti požadované maximální hodnotě ztrát 5% tedy dostáváme hodnotu 6,9%. To je zřejmě způsobeno nepřesnou regresí. Postupným zmenšováním rádiusu parabolické plochy v ZEMAXu a zadáním skutečných rozměrů čipu diody dostaneme pro dosažení maximální hodnoty podílu ztrátového světla 5% hodnotu parametru **Radius**: 1,14 mm. V tomto případě však již rozměry čipu diody kolidují s povrchem parabolického zrcadla.



Obr. 18: Průběh podílu ztrátového světla v závislosti na konstantě a (modře vyznačena hranice 5%).

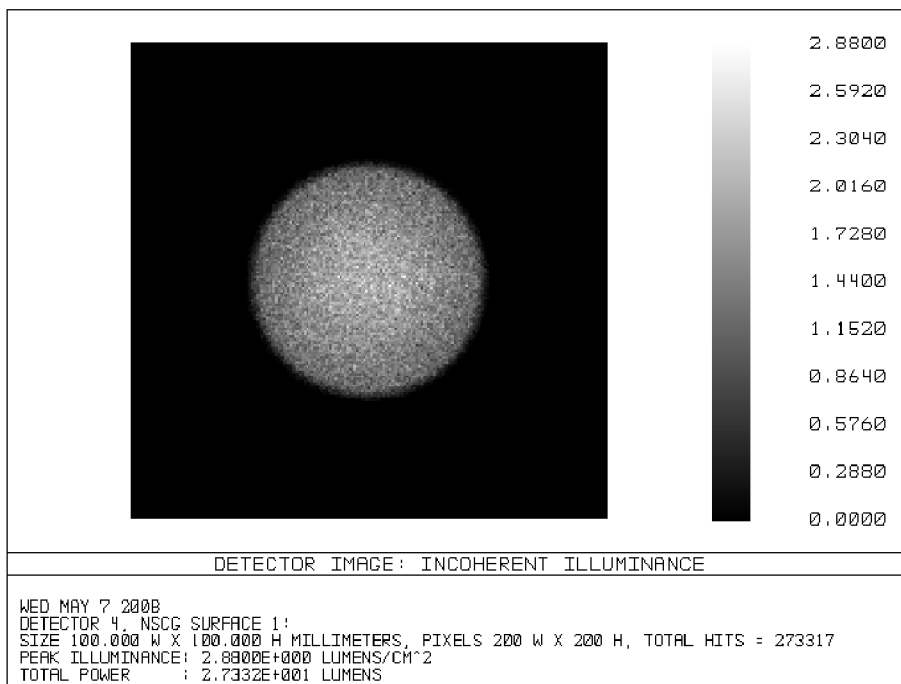
Dioda je navíc osazena čočkou o průměru $D = 5,5$ mm, je tedy třeba, aby zrcadlo mělo v zadní části otvor o tomto průměru. V takovém případě však není parabolické zrcadlo s výše určenými parametry použitelné. Po dalších úpravách v systému ZEMAX tak dostaneme parabolické zrcadlo s konstrukčně přijatelnými parametry Radius: 2,8 mm, Max Aper: 10,0 mm, Min Aper: 2,75 mm. Podíl ztrátového světla u takového zrcadla činí 27% (obr. 19).

Návrh osvětlovacího systému s parabolickým zrcadlem s využitím LED diody Philips LUXEON K2 TFFC tedy nebude vhodný pro konfokální mikroskop Confocal 2002, neboť neposkytuje dostatečný světelný tok pro osvětlení zorného pole mikroskopu. Přesto provedeme pro srovnání s dalšími návrhy analýzu osvětlení v jednotlivých rovinách soustavy.

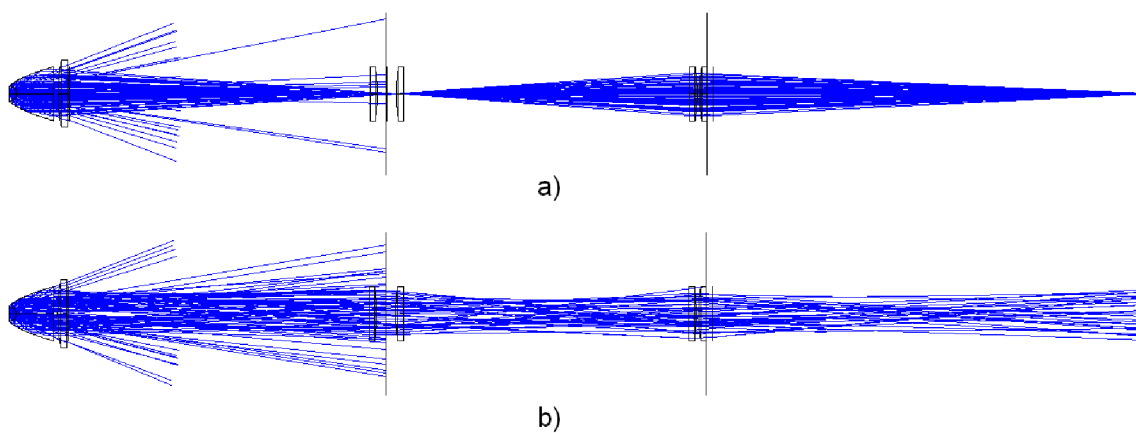
Pro fokusaci rovnoběžného svazku paprsků do roviny aperturní clonky použijeme jednoduchou plankonvexní čočku Edmund Optics NT32-862 z korunového skla BK7 s ohniskovou vzdáleností $f'_d = 124,6$ mm. Tato čočka zajistí osvětlení celého zorného pole a nulové ztráty v rovině polní čočky. Celá sestava je zobrazena na obr. 20. Jak je na obrázku patrné, paprsky, které se neodráží od zrcadla, po průchodu čočkou vychází ven ze soustavy a nejsou tak využity.

Po provedení analýzy v systému ZEMAX jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 21). Výpočet byl prováděn trasováním 10^6 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px a rozměrech 20 mm x 20 mm.

Na obr. 21a je zobrazen průběh osvětlení v rovině těsně za plankonvexní čočkou.



Obr. 19: Analýza podílu ztrátového světla při zobrazení bodového zdroje o světelném toku 100 lm parabolickým zrcadlem s parametrem Radius: 2,8 mm.



Obr. 20: Sestava s parabolickým zrcadlem v nesekvenčním módu systému ZEMAX: a) bodový zdroj, b) plošný zdroj s rozměry 1,8 mm x 1,8 mm.

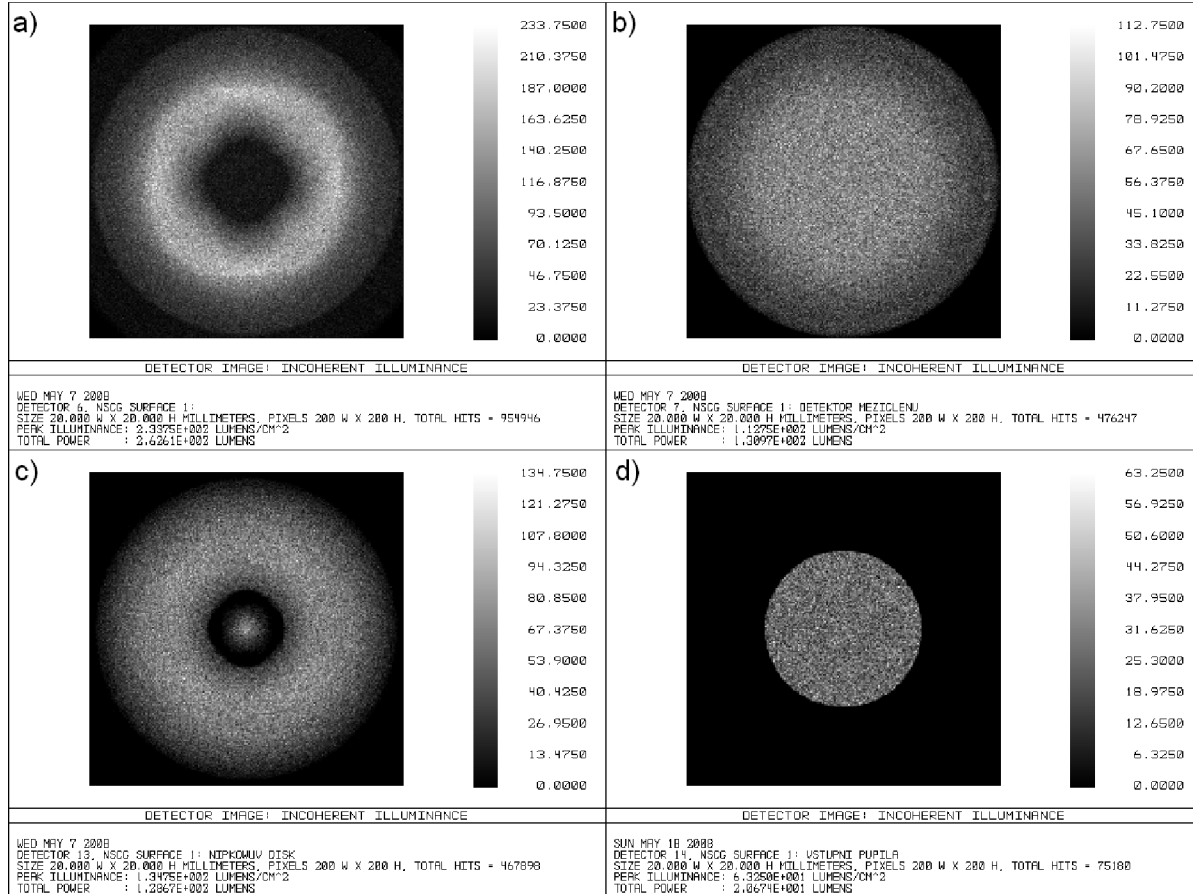
Ihned je patrný pokles intenzity ve středu detektoru. Tato rovina je promítána do roviny vzorku, který tak bude nerovnoměrně osvětlen. Rovinou prochází světelný tok 263 lm.

Na obr. 21b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. V této rovině je osvětlení rovnoměrné, avšak hodnota světelného toku dosahuje pouze 131 lm.

Na obr. 21c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Zde se opět projevuje nerovnoměrnost osvětlení, která způsobí nevhodné osvětlení roviny vzorku. Rovinou prochází světelný tok 129 lm.

Na obr. 21d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Rovinou prochází světelný tok 21 lm. Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok 0,1 lm.

Osvětlovací soustava využívající parabolické zrcadlo tedy dodává do roviny vstupní pupily objektivu 10% světelného toku soustavy s dokonale vycentrovanou výbojkou. Osvětlení vzorku však není rovnoměrné.



Obr. 21: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy s parabolickým zrcadlem: a) rovina za plankonvexní čočkou, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu.

5.3 Návrh s využitím eliptického zrcadla

Při dalším návrhu osvětlovací soustavy bylo využito eliptického zrcadla. Rotační elipsoid je v ZEMAXu popsán rovnicí ([8], str. 270)

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (10)$$

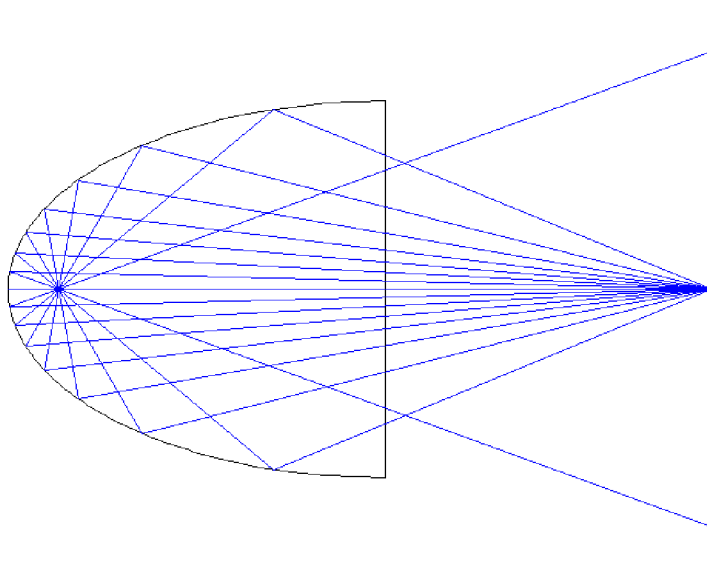
kde z je optická osa elipsoidu, c je reciproká hodnota rádiusu plochy, r je vzdálenost od optické osy a k je kónická konstanta, $k \in (-1, 0)$. Pro rádius plochy R a konstantu

k potom platí

$$R = \frac{1}{c} = \pm \frac{b^2}{a}, \quad (11)$$

$$k = -\epsilon^2 = -\frac{a^2 + b^2}{a^2}, \quad (12)$$

kde a, b jsou velikosti poloos elipsoidu a ϵ je tzv. číselná výstřednost. Pokud je bodový zdroj umístěný v ohnisku zrcadla, potom jsou odražené paprsky jdoucí z tohoto bodu fokusovány do druhého ohniska (obr. 22). Toto však opět platí pouze pro body ležící v ohnisku na optické ose, světlo z ostatních bodů již není fokusováno přesně do druhého ohniska zrcadla. Protože rozměry čipu diody jsou poměrně malé, pokusíme se do jednoho ohniska umístit diodu a fokusovat světlo do roviny aperturní clonky osvětlovací soustavy.



Obr. 22: Zobrazení bodového zdroje eliptickým zrcadlem.

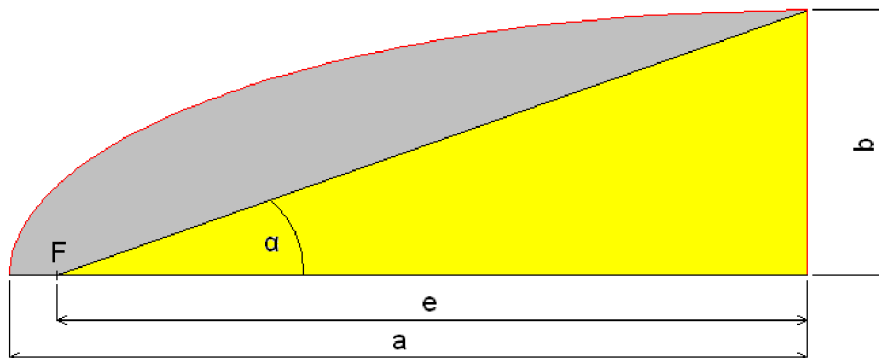
Ani při zobrazování eliptickým zrcadlem však není všechno světlo odráženo od zrcadla, část světla uniká ven a nemůže být dále v soustavě využita. Tyto paprsky vytvářejí kužel světla, jehož vrcholový úhel 2α (obr. 23), a tedy množství unikajícího světla, je ovlivněno velikostmi poloos elipsoidu. Přitom čím větší je poměr $\frac{a}{b}$ poloos elipsy, tím menší je vrcholový úhel kužele 2α a tím více světla je tedy odráženo eliptickým zrcadlem a dále využito v soustavě.

Stejně jako v předchozí kapitole i eliptické zrcadlo budeme navrhovat s výstupním průměrem $D_E = 20$ mm (tj. $b = 10$ mm) a budeme sledovat množství ztrátového světla závislé na velikosti poloosy a . Pro výstřednost elipsy e platí

$$e = \sqrt{a^2 - b^2}. \quad (13)$$

Pokud zdroj považujeme za bodový, platí podle obr. 23 pro úhel α vztah

$$\alpha = \arctan\left(\frac{b}{e}\right) = \arctan\left(\frac{b}{\sqrt{a^2 - b^2}}\right). \quad (14)$$



Obr. 23: K výpočtu ztrátového světla eliptického zrcadla.

Pokud známe úhly α odpovídající jednotlivým hodnotám velikosti poloosy a , můžeme provést numerickou integraci vyzařovací křivky diody (obr. 14) v daném rozsahu úhlů α . Takto zjistíme poměr množství ztrátového světla vůči celkovému světelnému toku diody. Výpočet byl prováděn pro 15 hodnot v rozsahu $a = (10 \div 150)$ mm (viz tab. 9). Protože potřebujeme využít alespoň 95% světelného toku diody (viz kap. 5.1), stanovíme opět kritérium pro maximální přípustné ztráty 5%. Použitím mocninné regrese (obr. 24) dostaneme závislost podílu ztrátového světla na velikosti poloosy a jako mocninnou funkci

$$y = 102,86 \cdot a^{-2,0136}. \quad (15)$$

Pro požadavek 5% ztrátového světla tedy dostáváme hodnotu poloosy $a = 44,2$ mm. Této hodnotě v ZEMAXu dle rov. (11) a (12) odpovídají parametry Radius:

$$R = \pm \frac{b^2}{a} = \pm \frac{10^2}{44,2} = \pm 2,262 \text{ mm} \quad (16)$$

a Conic:

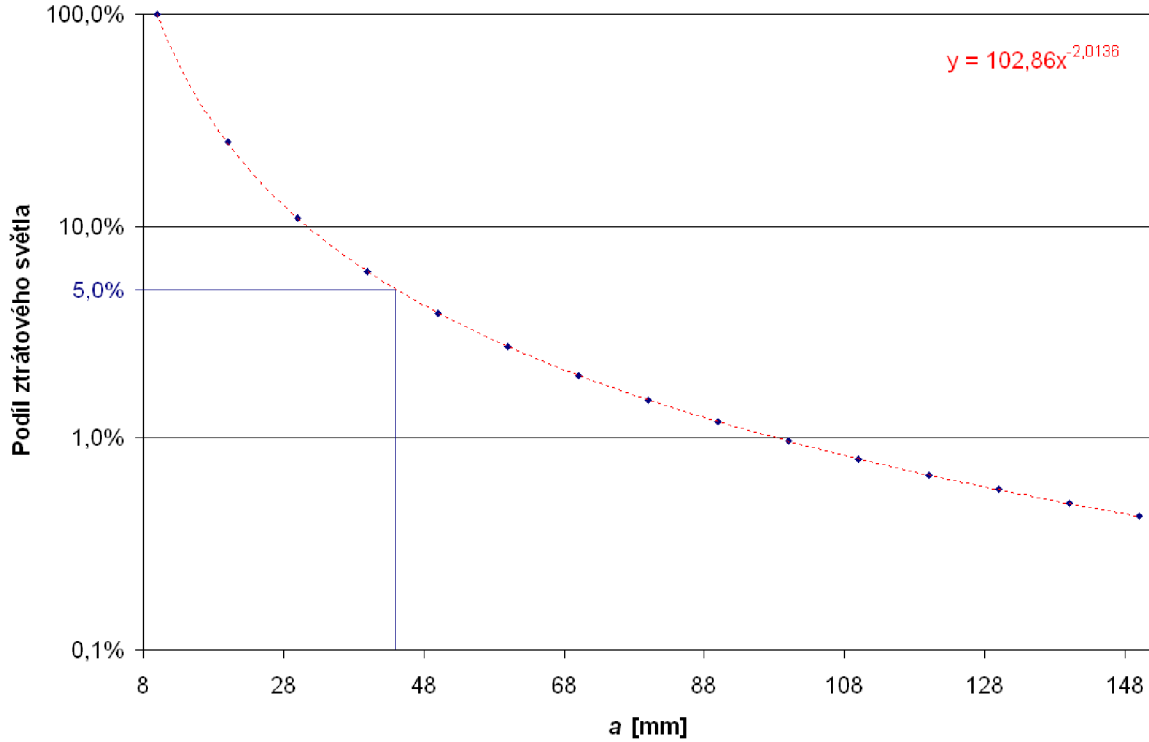
$$k = -\frac{a^2 + b^2}{a^2} = -\frac{44,2^2 + 10^2}{44,2^2} = -0,949. \quad (17)$$

Poloosa a [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80
Úhel α [°]	90	30	19,5	14,5	11,5	9,6	8,2	7,2
Hodnota integrálu S	11658,1	5820,1	3843,9	2874,2	2296,1	1911,83	1637,9	1432,7
Podíl ztrátového světla [%]	100,00	24,92	10,87	6,08	3,88	2,69	1,97	1,51

Hodnoty vypočtené v předchozím odstavci můžeme opět ověřit v systému ZEMAX. Stejně jako v předchozí kapitole nadefinujeme bodový zdroj podle tab. 7 pomocí objektu *Source Radial* a jeho světelný tok nastavíme na 100 lm, poté pomocí objektu *Standard Surface* nadefinujeme eliptické zrcadlo dle vypočtených hodnot a v kolonce **Material** zadáme hodnotu **ABSORB**. Za zrcadlo umístíme detektor (*Detector Rect*). Po provedení trasování dostaneme výslednou hodnotu světelného toku 5,1 lm, tj. 5,1% celkového světelného toku. Výpočet podílu ztrátového světla pomocí mocninné regrese je tedy správný.

90	100	110	120	130	140	150
6,4	5,7	5,2	4,8	4,4	4,1	3,8
1273,3	1145,8	1041,5	954,7	881,2	818,2	763,7
1,19	0,97	0,80	0,67	0,57	0,49	0,43

Tab. 9: Výpočet podílu ztrátového světla v závislosti na velikosti poloosy a .

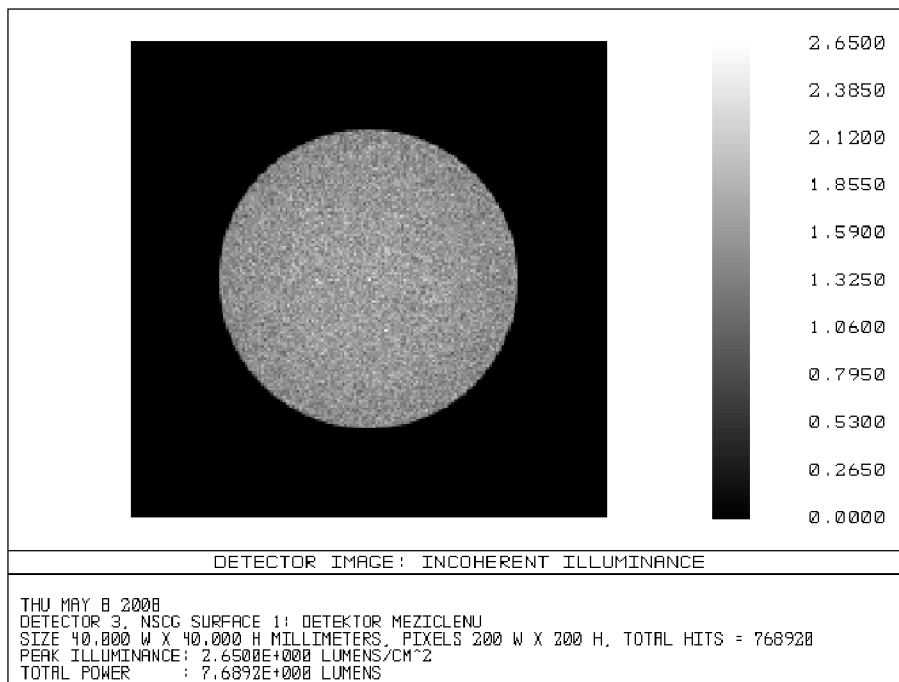


Obr. 24: Průběh podílu ztrátového světla v závislosti na velikosti poloosy a (modře vyznačena hranice 5%).

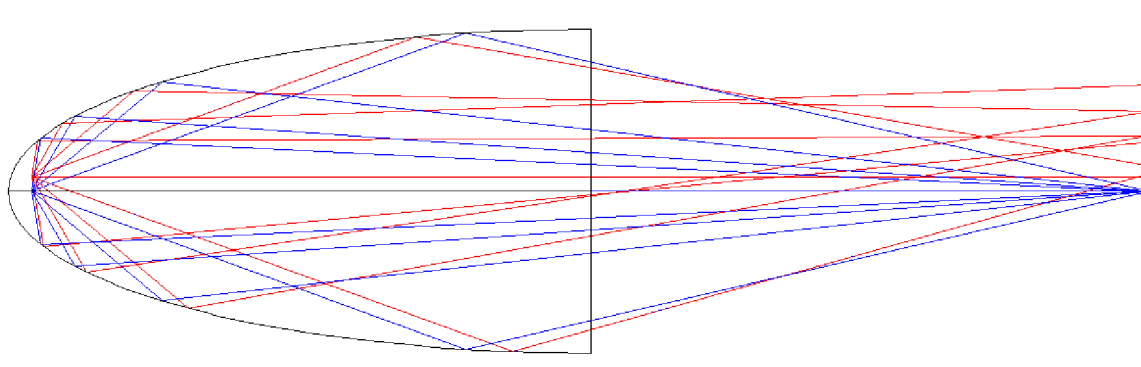
Rozměry čipu tentokrát nekolidují s povrchem zrcadla, avšak po vytvoření otvoru pro čočku diody $D = 5,5$ mm bude část světla unikat zadní částí zrcadla, neboť ohnisko se nachází před rovinou tohoto otvoru. Je tedy třeba velikost poloosy a zrcadla ještě zmenšit. Postupným zmenšováním tohoto rozměru v ZEMAXu dostaneme eliptické zrcadlo s parametry $a = 36$ mm a $b = 10$ mm, tj. Radius: 2,8 mm, Conic: -0,922, Max Aper: 10,0 mm, Min Aper: 2,75 mm. Podíl ztrátového světla u takového zrcadla je menší než u parabolického zrcadla a činí 7,7% (obr. 25).

Pokud nyní budeme uvažovat zdroj konečných rozměrů (čip diody 1,8 mm x 1,8 mm) a sledovat paprsky vycházející z jeho okrajových částí, zjistíme, že paprsky již nejsou zrcadlem uspokojivě fokusovány (obr. 26). Ani takto navržené zrcadlo tedy není vhodné pro osvětlovací soustavu konfokálního mikroskopu Confocal 2002. Přesto pro další porovnání návrhů opět provedeme analýzu osvětlení a světelného toku v jednotlivých rovinách soustavy.

Zdroj umístěný v ohnisku eliptického zrcadla je tedy zobrazován do druhého ohniska



Obr. 25: Analýza podílu ztrátového světla při zobrazení bodového zdroje o světelném toku 100 lm eliptickým zrcadlem s parametry Radius: 2,8 mm a Conic: -0,922.



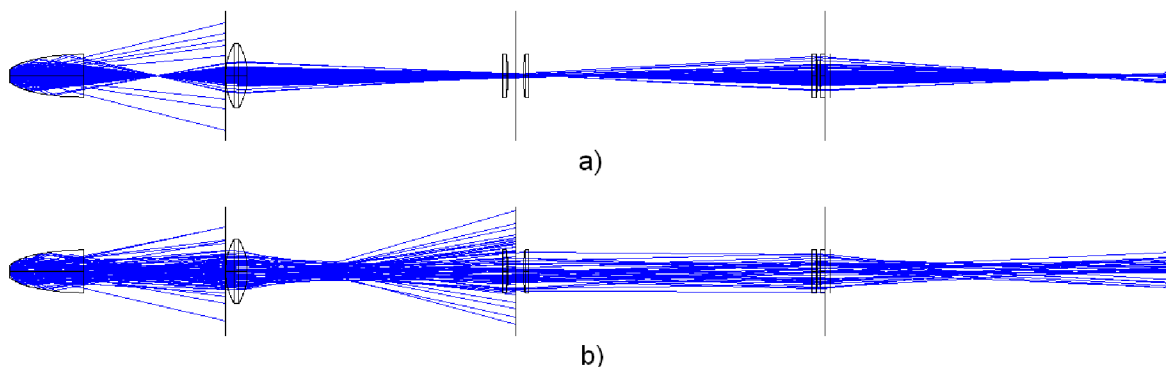
Obr. 26: Zobrazení bodového zdroje eliptickým zrcadlem s parametry Radius: 2,8 mm a Conic: -0,922. Modrá - bod umístěný v ohnisku zrcadla, červená - bod v ohniskové rovině vzdálený 0,9 mm od optické osy.

ve vzdálenosti $2e = 69,2$ mm a vzniká tak kužel světla o vrcholovém úhlu

$$2\alpha_E = 2 \cdot \arctan\left(\frac{b}{e}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{10,0}{34,6}\right) = 32,3^\circ. \quad (18)$$

V kap. 4.3 jsme určili, že v sestavě s výbojkou prochází rovinou aperturní clonky kužel světla o vrcholovém úhlu $2\alpha' = 6,1^\circ$, proto je třeba vrcholový úhel kužele světla vystupujícího z navrženého zrcadla zmenšit. K tomu použijeme jednoduchou bikonvexní čočku Melles Griot LDX 057, pomocí které zobrazíme obraz zdroje vytvořený v druhém

ohnisku eliptického zrcadla do roviny aperturní clonky. Ohnisková vzdálenost této čočky je $f_d = 30,0$ mm. Vzniklá soustava je zobrazena na obr. 27.



Obr. 27: Sestava s eliptickým zrcadlem v nesequenčním módu systému ZEMAX: a) bodový zdroj, b) plošný zdroj s rozměry 1,8 mm x 1,8 mm.

Po provedení analýzy v systému ZEMAX jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 28). Výpočet byl prováděn trasováním 10^6 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px a rozměrech 20 mm x 20 mm.

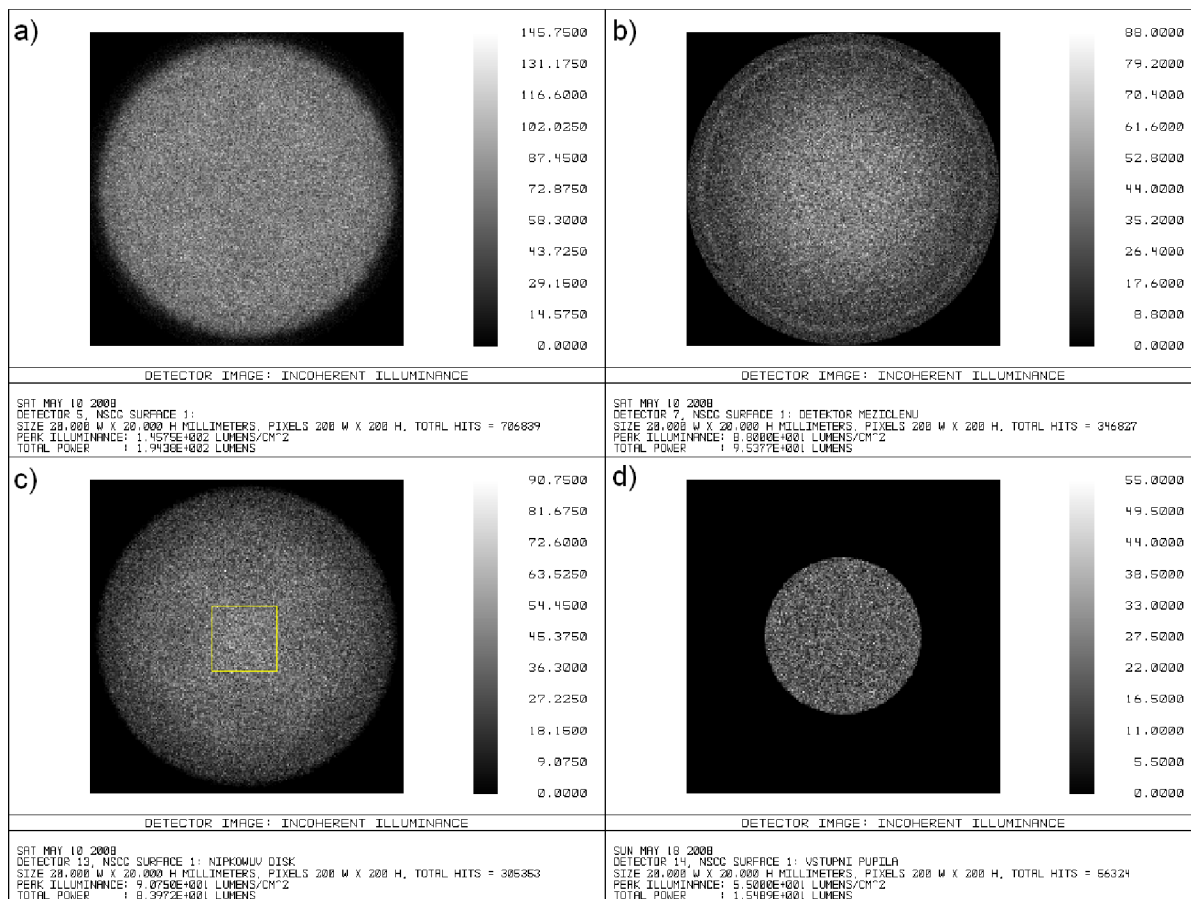
Na obr. 28a je zobrazen průběh osvětlení v rovině těsně za bikonvexní čočkou. Osvětlení je rovnoměrné s maximální hodnotou 146 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 194 lm.

Na obr. 28b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. V této rovině je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 88 lm/cm^2 , avšak hodnota světelného toku již dosahuje pouze 95 lm.

Na obr. 28c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. I zde je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 91 lm/cm^2 . Zprůměrováním hodnot části detektoru označené žlutým čtvercem o rozměrech 45 px x 45 px dostaneme průměrnou hodnotu osvětlení 44 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 84 lm.

Na obr. 28d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Rovinou prochází světelný tok 15 lm. Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok 0,08 lm.

Ani osvětlovací soustava využívající eliptické zrcadlo tedy dodává do roviny vstupní pupily objektivu 8% světelného toku soustavy s dokonale vycentrovanou výbojkou.



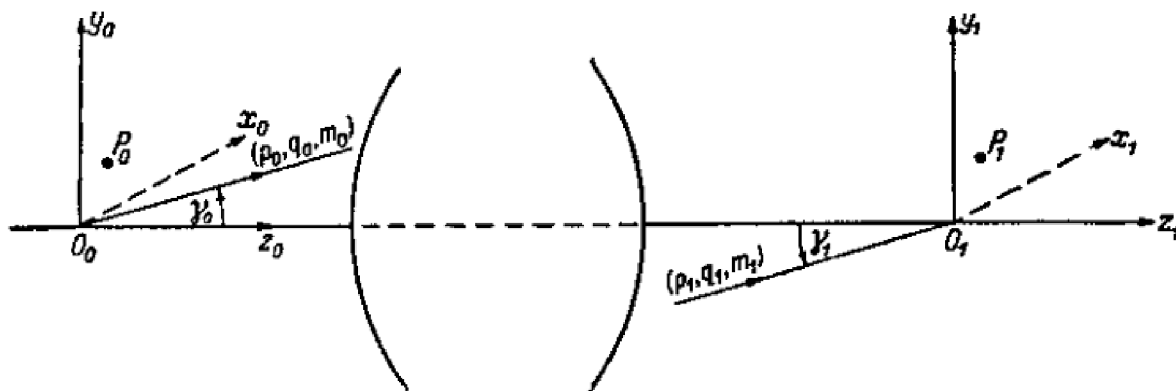
Obr. 28: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy s eliptickým zrcadlem: a) rovina za bikonvexní čočkou, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu. Žlutý čtverec označuje oblast, ze které byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

5.4 Návrh s využitím čočkového kolektoru

Další možností je návrh osvětlovací soustavy s využitím klasického čočkového kolektoru. Protože vyzařovací úhel diody je velký, bude zapotřebí kolektor s hodnotou numerické apertury $NA \rightarrow 1$. Obraz diody bude promítán do roviny aperturní clonky a měl by mít maximální rozměry 7,0 mm x 7,0 mm; to odpovídá hodnotě příčného zvětšení $\beta_K \geq -3,7$. Hlavními požadavky tedy bude vysoká hodnota numerické apertury NA a malé zvětšení β_K . Tyto dva požadavky jsou však protichůdné, jak plyne např. ze sinové podmínky (viz [12], str. 167–168) platné pro stigmatické zobrazení

$$n_1 y_1 \sin \gamma_1 = n_0 y_0 \sin \gamma_0, \quad (19)$$

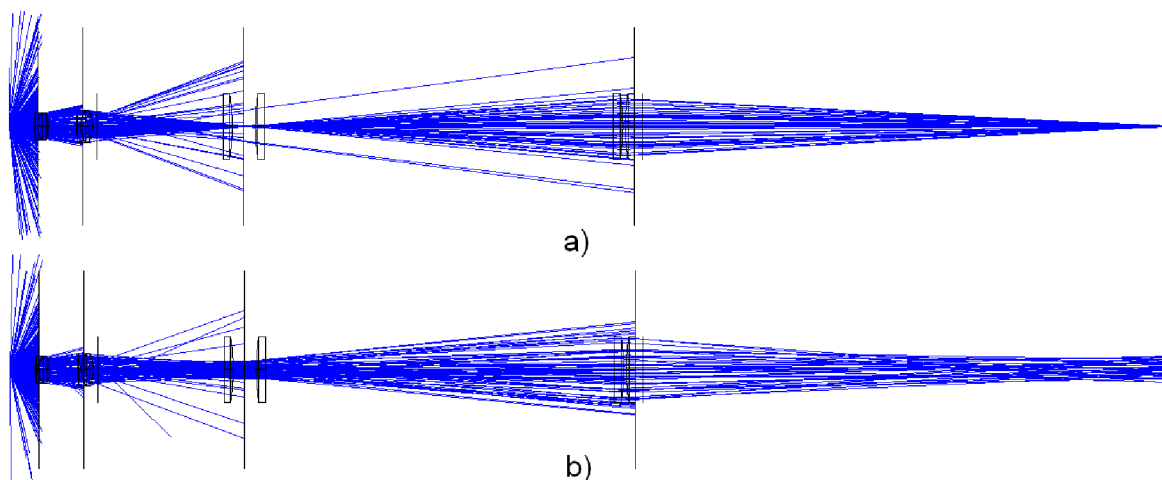
kde n_0, n_1 jsou indexy lomu, y_0, y_1 jsou velikosti předmětu a obrazu a γ_0, γ_1 jsou úhly svírané paprsky s optickou osou (obr. 29). Pokud tedy pomocí optické soustavy zmenšíme úhel svíraný paprsky s optickou osou ($\frac{\gamma_1}{\gamma_0} < 1$), potom nutně dojde k nárůstu zvětšení β_K . Ani návrh s využitím čočkového kolektoru tedy zřejmě nepovede k efektivnímu využití



Obr. 29: K vysvětlení sinové podmínky ([12], str. 167).

světla LED diody v optické soustavě mikroskopu, neboť pro požadované zvětšení bude mít kolektor nízkou hodnotu numerické apertury a nevyužije tak většinu světla diody.

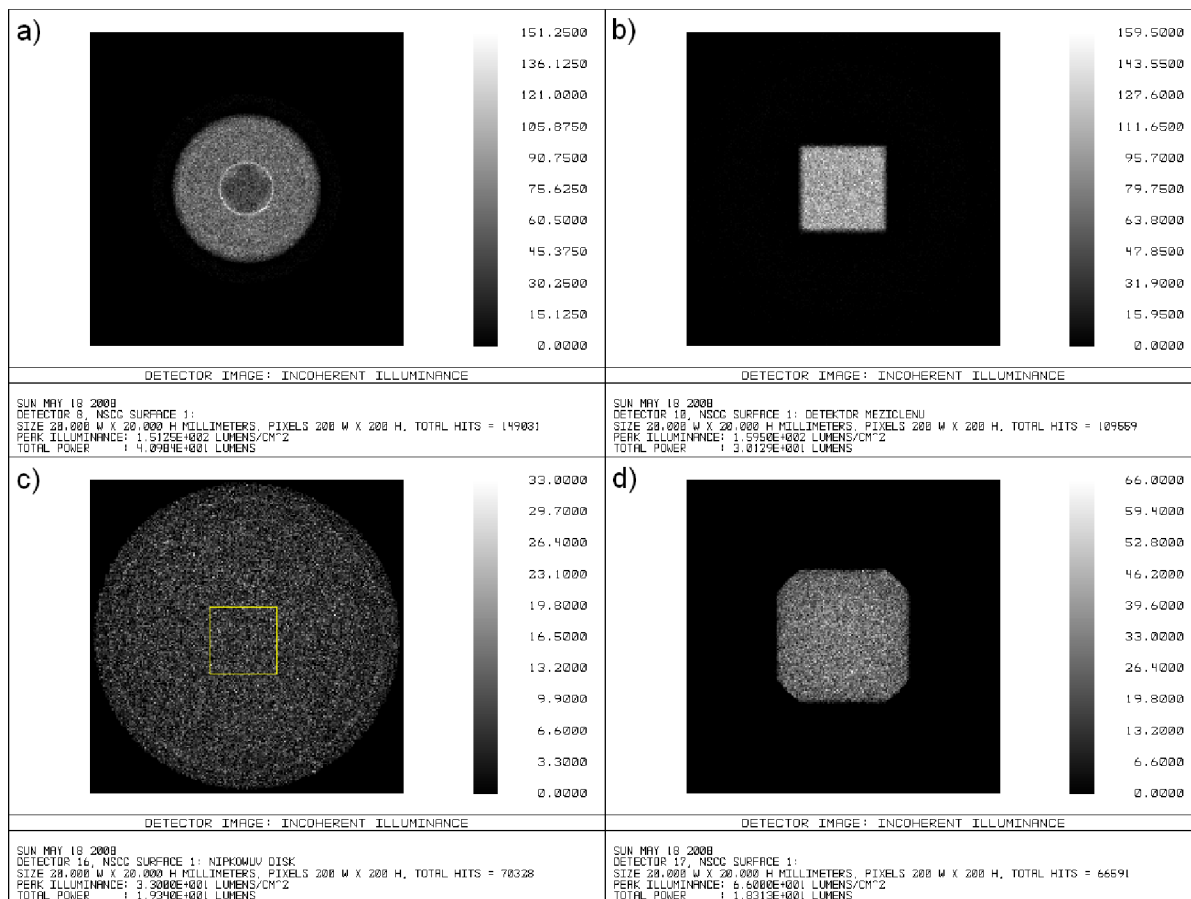
Při návrhu využijeme jako kolektor mikroobjektiv K_001.ZMX z databáze ZEBASE programu ZEMAX s upraveným poloměrem lámavé plochy $R_4 = 30\text{mm}$. Takto upravený kolektor zajistí zobrazení zdroje do roviny vstupní pupily s požadovaným zvětšením. Výsledná soustava je na obr. 30.



Obr. 30: Sestava s čočkovým kolektorem v nesequenčním módu systému ZEMAX: a) bodový zdroj, b) plošný zdroj s rozměry 1,8 mm x 1,8 mm.

Po provedení analýzy v systému ZEMAX jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 31). Výpočet byl prováděn trasováním 10^6 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px a rozměrech 20 mm x 20 mm.

Na obr. 31a je zobrazen průběh osvětlení v rovině těsně za kondenzorem. Osvětlení dosahuje maximální hodnoty 151 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 41 lm.



Obr. 31: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy s čočkovým kondenzorem: a) rovina za kondenzorem, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu. Žlutý čtverec označuje oblast, ze které byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

Na obr. 31b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. V této rovině je vytvořen obraz čtvercového čipu diody s maximální hodnotou osvětlení 160 lm/cm^2 . Hodnota světelného toku dosahuje 30 lm .

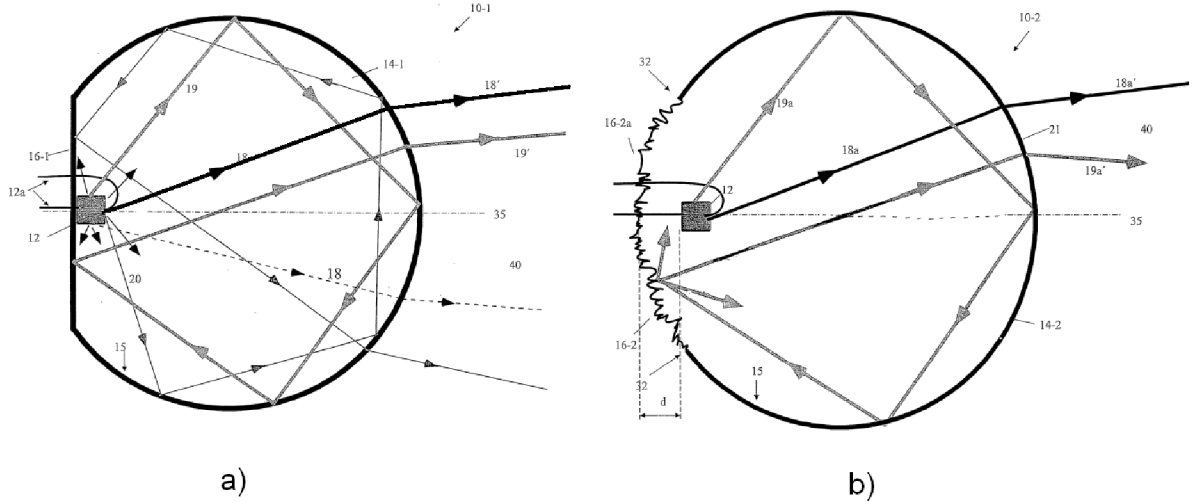
Na obr. 31c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Zde je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 33 lm/cm^2 . Zprůměrováním hodnot části detektoru označené žlutým čtvercem o rozměrech $45 \text{ px} \times 45 \text{ px}$ dostaneme průměrnou hodnotu osvětlení 7 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 19 lm .

Na obr. 31d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. I zde je patrný obraz čipu diody ořezaný v rozích průměrem vstupní pupily. Do roviny dopadá světelný tok 18 lm . Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok $0,09 \text{ lm}$.

Osvětlovací soustava využívající čočkového kondenzoru tedy dodává do roviny vstupní pupily objektivu 9% světelného toku soustavy s dokonale vycentrovanou výbojkou.

5.5 Návrh s využitím sférického kondenzoru

Dalším návrhem je osvětlovací soustava se sférickým kondenzorem (obr. 32). Toto zařízení je patentováno a popsáno viz [13] a [14]. Sférický kondenzor je tvořen koulí ze skla nebo plastu, do které je vsazena LED dioda, a klasickým nebo rozptylným zrcátkem. Paprsky vycházející z LED diody jsou na povrchu koule buďto lámány podle Snellova zákona ([12], str. 38; černé paprsky na obr. 32), nebo dochází k totálnímu odrazu ([12], str. 47; šedé paprsky na obr. 32). Paprsky procházející koulí pod totálním odrazem jsou využity díky zrcátku, které změni úhel dopadu paprsku vůči povrchu koule.



Obr. 32: Sférický kondenzor s a) klasickým zrcátkem, b) rozptylným zrcátkem [14].

Sférický kondenzor využívající klasického zrcátka je na obr. 32a. Část koule je uříznuta a pokovena. Kondenzor využívající rozptylného zrcátka je na obr. 32b. V tomto případě je část povrchu koule zdrsňena a na tuto část je nanášena odrazná vrstva. V obou případech je potom v zadní části vyvrtán otvor pro vložení LED diody, která je v kouli zatmelena tmelem s indexem lomu blízkým materiálu koule. Toto zařízení umožňuje využití výkonu diody s účinností až 90%. Účinnost kondenzoru je závislá na indexu lomu koule. Pro výstupní úhel paprsků θ vycházejících z diody a lámáných na povrchu koule platí [13]

$$\theta = 2\theta_1 - \arcsin(n \sin \theta_1), \quad (20)$$

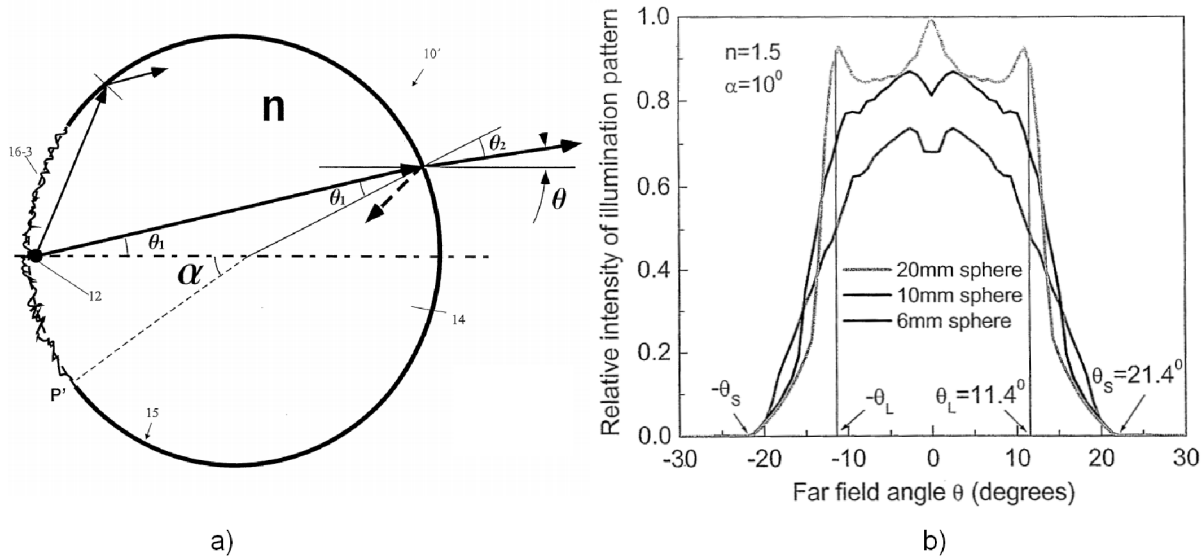
kde n je index lomu koule a θ_1 je úhel svíraný paprskem s optickou osou (viz obr. 33a) splňující podmínku $\theta_1 \leq \arcsin(1/n)$. Pro maximální hodnotu úhlu θ paprsků jdoucích z diody a přímo vyzařovaných z koule platí [13] (viz obr. 33b)

$$\theta_L = 2 \arcsin \left(\frac{4 - n^2}{3n^2} \right)^{1/2} - \arcsin \left(\frac{4 - n^2}{3} \right)^{1/2}, \quad (21)$$

kde n je index lomu koule. Tento úhel je tedy závislý pouze na indexu lomu, průměr koule ani ostatní parametry zařízení nemají na hodnotu úhlu θ_L vliv. Pro maximální vyzařovací úhel paprsků odrážených na zrcátku po totálním odrazu platí [13] (viz obr. 33)

$$\theta_S = \theta_L + \alpha, \quad (22)$$

kde α je úhel svíraný okrajovým bodem zrcátka P' s optickou osou (viz obr. 33a). Tento úhel je tedy závislý na velikosti rozptylného zrcátka. Průběh relativní intenzity v závislosti na výstupním úhlu je na obr. 33b. Z grafu je patrné, že průměr koule má výrazný vliv na průběh relativní intenzity a tedy i na rovnoměrnost osvětlení v rovině detektoru. Přitom koule o menším průměru dávají rovnoměrnější průběh osvětlení, neboť u koulí větších průměrů výrazně rostou maxima intenzity na optické ose a ve směru θ_L . Efektivita kondenzoru roste se snižujícím se indexem lomu koule, avšak zároveň roste i vyzařovací úhel.



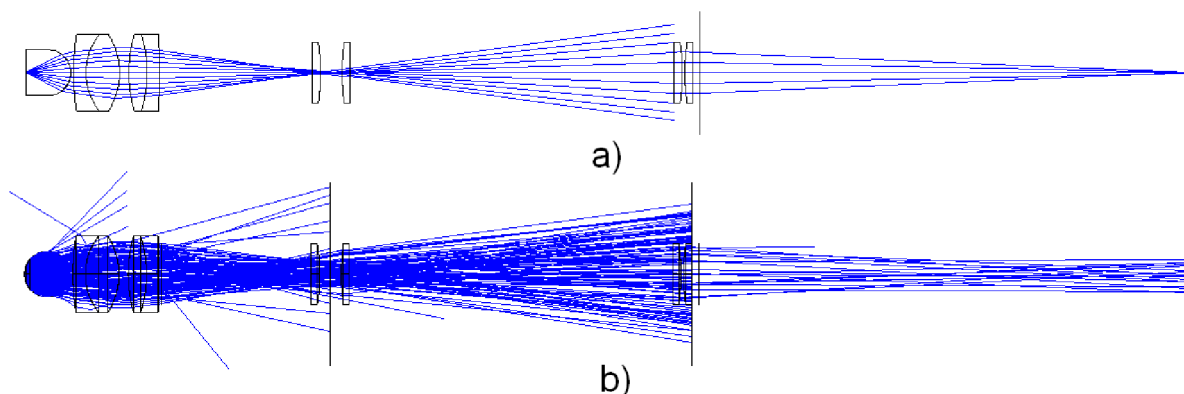
Obr. 33: a) Schéma sférického kondenzoru s popisky. b) Průběh relativní intenzity v závislosti na výstupním úhlu z kondenzoru pro různé průměry koule a $n = 1,5$, $\alpha = 10^\circ$ [14].

Při návrhu sférického kondenzoru budeme vycházet z požadavku rovnoměrného osvětlení, malého vyzařovacího úhlu a vysoké efektivity. Pro efektivitu kondenzoru 90% odpovídá index lomu $n = 1,5$ a rovnoměrné osvětlení zajistí průměr koule $D_K = (10 \div 20)$ mm. Většina světelného toku vyzařovaného z kondenzoru potom prochází kuželem světla o vrcholovém úhlu $2\theta_L = 22,8^\circ$. Kondenzor tedy navrhne z obvyklého optického skla BK7 s průměrem $D_K = 15$ mm. Za kondenzor umístíme pomocnou čočku, která bude zobrazovat zdroj z vnitřku koule do roviny aperturní clonky. Pro celkové zvětšení soustavy kondenzoru a koule β_C platí

$$\beta_C = \beta_K \cdot \beta_{PC}, \quad (23)$$

kde β_K je zvětšení kulové plochy kondenzoru a β_{PC} je zvětšení pomocné čočky. Jak již bylo určeno v předchozí kapitole, aby byl obraz diody celý zobrazen do aperturní clonky, musí být dioda zobrazena se zvětšením $\beta_C \geq -3,7$. Protože kulová plocha kondenzoru vnáší do této soustavy zvětšení $\beta_K = 2,9$, dostáváme pro zvětšení pomocné čočky hodnotu $\beta_{PC} \geq -1,3$, avšak při této hodnotě již bude docházet k velkým ztrátám světla v rovině polní čočky vlivem velké rozbíhavosti paprsků světla vůči optické ose. Jako pomocnou čočku proto použijeme dvojitý dublet Edmund Optics NT47-296, soustava

kondenzoru a čočky potom bude mít celkové zvětšení $\beta_C = -5,3$. Ačkoliv neprojde celý obraz zdroje vstupní pupilou objektivu, je toto uspořádání výhodnější, neboť soustavou projde větší množství světla vlivem menší rozbíhavosti paprsků vůči optické ose. Chod paprsků v této soustavě je na obr. 34. V rovině vstupní pupily objektivu vzniká obraz diody o velikosti zhruba 12 mm x 12 mm. Jak je z obrázku patrné, v rovině polní čočky dochází ke ztrátám světla a do roviny Nipkowova disku tak většina paprsků neprojde. Ani takto tedy nelze využít většinu světelného toku diody.



Obr. 34: Chod paprsků v soustavě se sférickým kondenzorem a pomocnou čočkou v a) sekvenčním módu systému ZEMAX, b) nesequenčním módu systému ZEMAX.

Pro modelování sférického kondenzoru s rozptylným zrcátkem použijeme v nesequenčním módu systému ZEMAX objekty *Sphere* a *Standard Surface*. Dovnitř koule umístíme diodu (*Source Radial*). Objekt *Standard Surface* bude sloužit jako rozptylné zrcátko. Proto je třeba nadefinovat na této ploše rozptyl a při výpočtu v okně *Detector Control* zapnout volbu *Scatter Rays*. Paprsky dopadající do otvoru v kouli vytvořeného pro diodu budou absorbovány a proto v této části koule vytvoříme další objekt *Standard Surface* s vlastností **Material** nastavenou na hodnotu **ABSORB**.

Po provedení analýzy v systému ZEMAX jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 35). Výpočet byl prováděn trasováním 10^6 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px a rozměrech 20 mm x 20 mm.

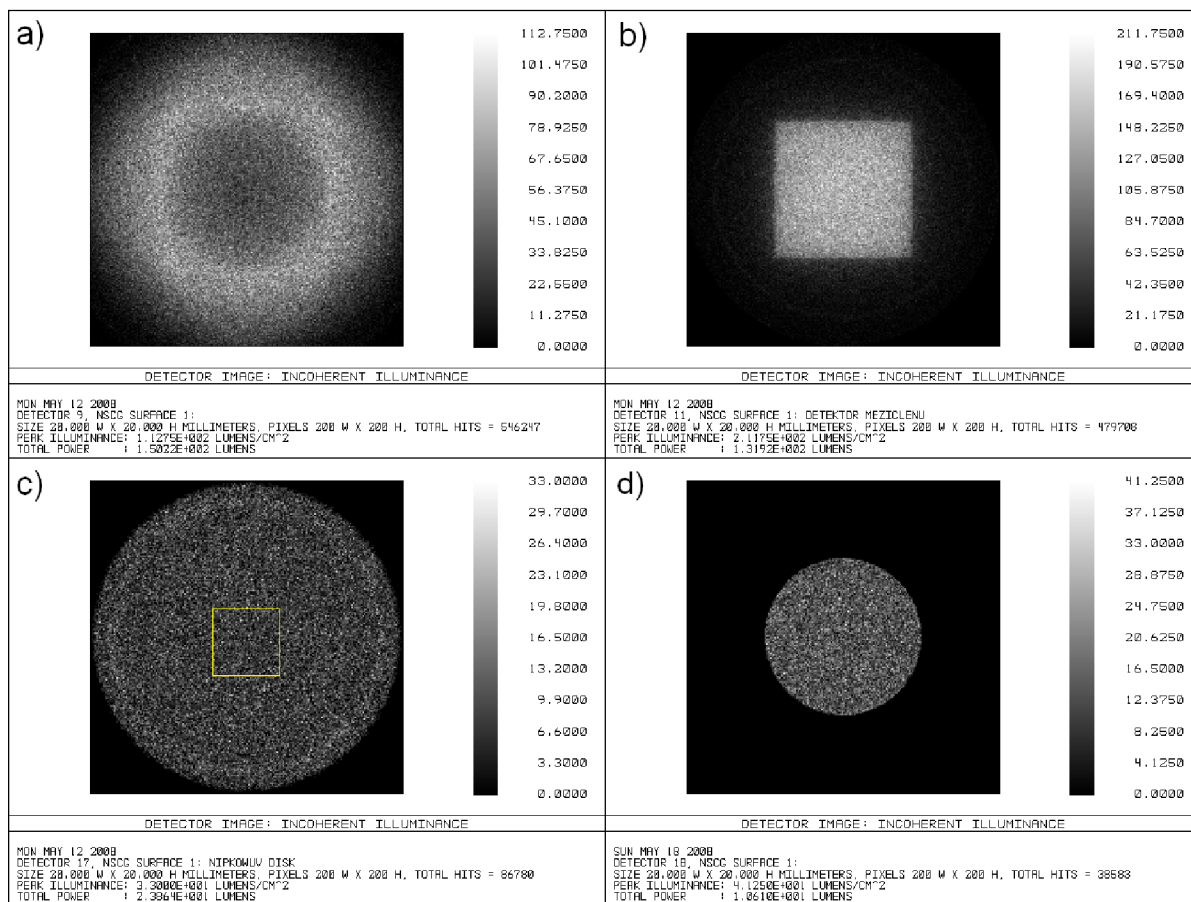
Na obr. 35a je zobrazen průběh osvětlení v rovině těsně za pomocnou čočkou. Osvětlení dosahuje maximální hodnoty 113 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 150 lm.

Na obr. 35b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. V této rovině je jasně patrný obraz čtvercového čipu diody s maximální hodnotou osvětlení 212 lm/cm^2 . Hodnota světelného toku zde dosahuje 132 lm.

Na obr. 35c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Zde je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 33 lm/cm^2 . Zprůměrováním hodnot části detektoru označené žlutým čtvercem o rozměrech 45 px x 45 px dostaneme průměrnou hodnotu osvětlení 8 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 24 lm.

Na obr. 35d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Do roviny dopadá světelný tok 11 lm. Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok 0,05 lm.

Ani osvětlovací soustava využívající sférický kondenzor tedy dodává do roviny vstupní pupily objektivu 5% světelného toku soustavy s dokonale vycentrovanou výbojkou.



Obr. 35: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy se sférickým kondenzorem: a) rovina za kondenzorem, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu. Žlutý čtverec označuje oblast, ze které byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

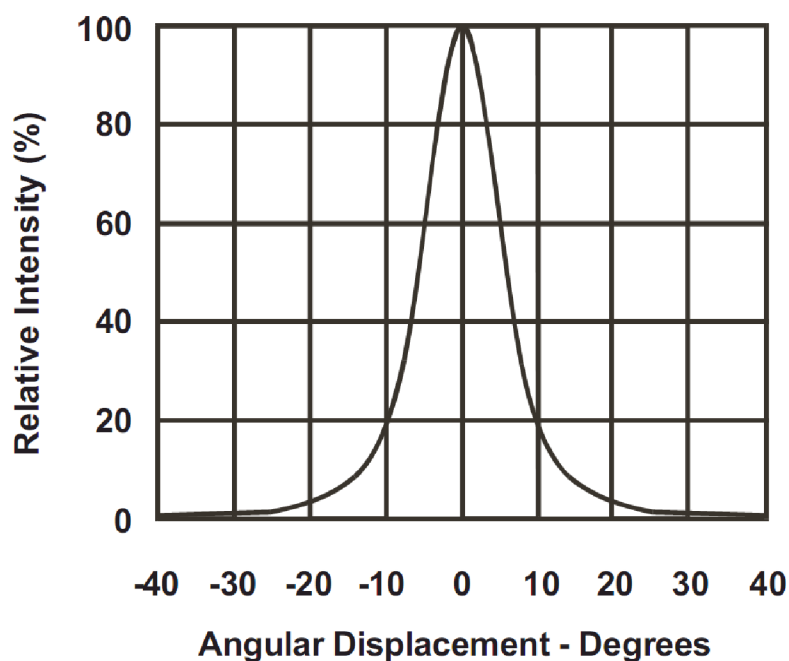
5.6 Návrh s využitím kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05

Při posledním návrhu jsme využili kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 (obr. 36) určený pro LED diody Philips LUXEON. Nejde o kolimátor v pravém slova smyslu, neboť zařízení neprodukuje kolimovaný svazek, ale rozbíhavý svazek paprsků. Většina světelného toku diody je z kolimátoru vyzařována v kuželu světla o vrcholovém úhlu $2\alpha = 10^\circ$ (viz vyzařovací diagram na obr. 37). Zařízení je vyrobeno z materiálu PMMA a kombinuje jednoduchou plankonvexní čočku a odraznou část využívající totální odraz. Výrobce je udávána optická účinnost až 90%.

Model kolimátoru byl vytvořen podle rozměrů uvedených na obr. 38 v programu Autodesk Inventor a poté exportován do prostředí ZEMAXu ve formátu STL objektu. Hlavní rozměry byly získány z technické dokumentace [15], ostatní rozměry byly získány měřením.

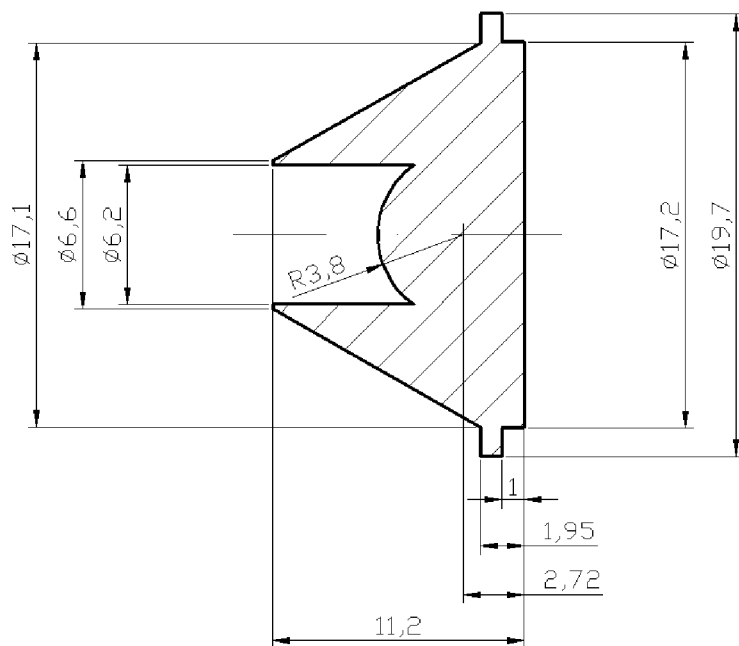


Obr. 36: Kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 [15].



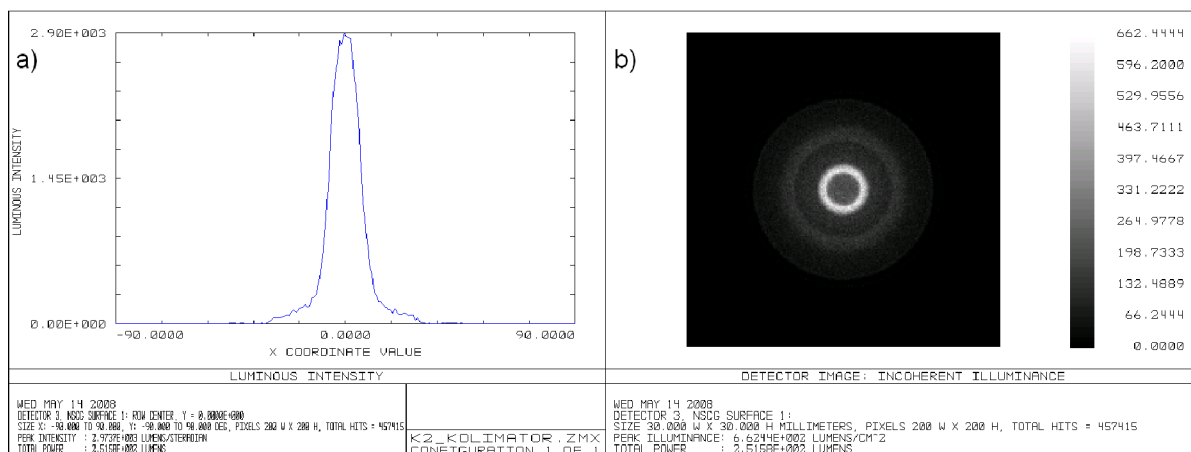
Obr. 37: Vyzařovací diagram kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 [15].

Pro ověření vyzařovací charakteristiky modelu jsme provedli jednoduchou analýzu osvětlení v rovině těsně za výstupní rovinnou plochou kolimátoru. Využit byl již dříve vytvořený model diody Philips LUXEON K2. Trasování přes objekty STL výrazně zpomaluje výpočet a doba výpočtu potom dosahuje hodnot kolem 1 hod na procesoru 2,2 GHz při trasování 10^6 paprsků. Přesto byl při analýze použit model kolimátoru ve formátu STL, jak bude uvedeno dále. Výsledky analýzy jsou na obr. 39. Na obr. 39a je závislost svítivosti na vyzařovacím úhlu. Charakteristika modelu dobře odpovídá vyzařovacímu diagramu udávanému výrobcem (obr. 37). Na obr. 39b je potom průběh osvětlení v rovině detektoru umístěného těsně za rovinnou plochou kolimátoru. Z průběhu je zřejmé, že osvětlení této roviny je nerovnoměrné. Pokud bychom tedy použili zjednodušený model



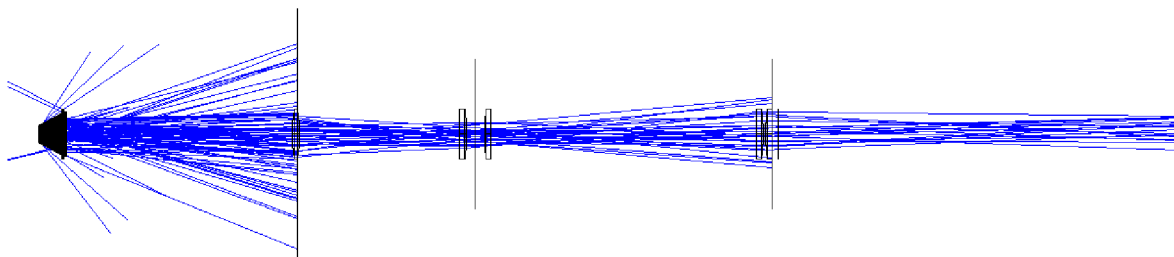
Obr. 38: Rozměry kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 použité při vytváření jeho modelu.

kolimátoru vytvořený objektem *Source Radial* nastaveným na daný vyzařovací diagram a přenášeli pomocnou čočkou obraz výstupní roviny kolimátoru do roviny aperturní clonky, vznikl by v této rovině odlišný obrazec neodpovídající skutečnosti. Proto je při analýzách tohoto systému vhodné použít model vytvořený pomocí STL objektu.

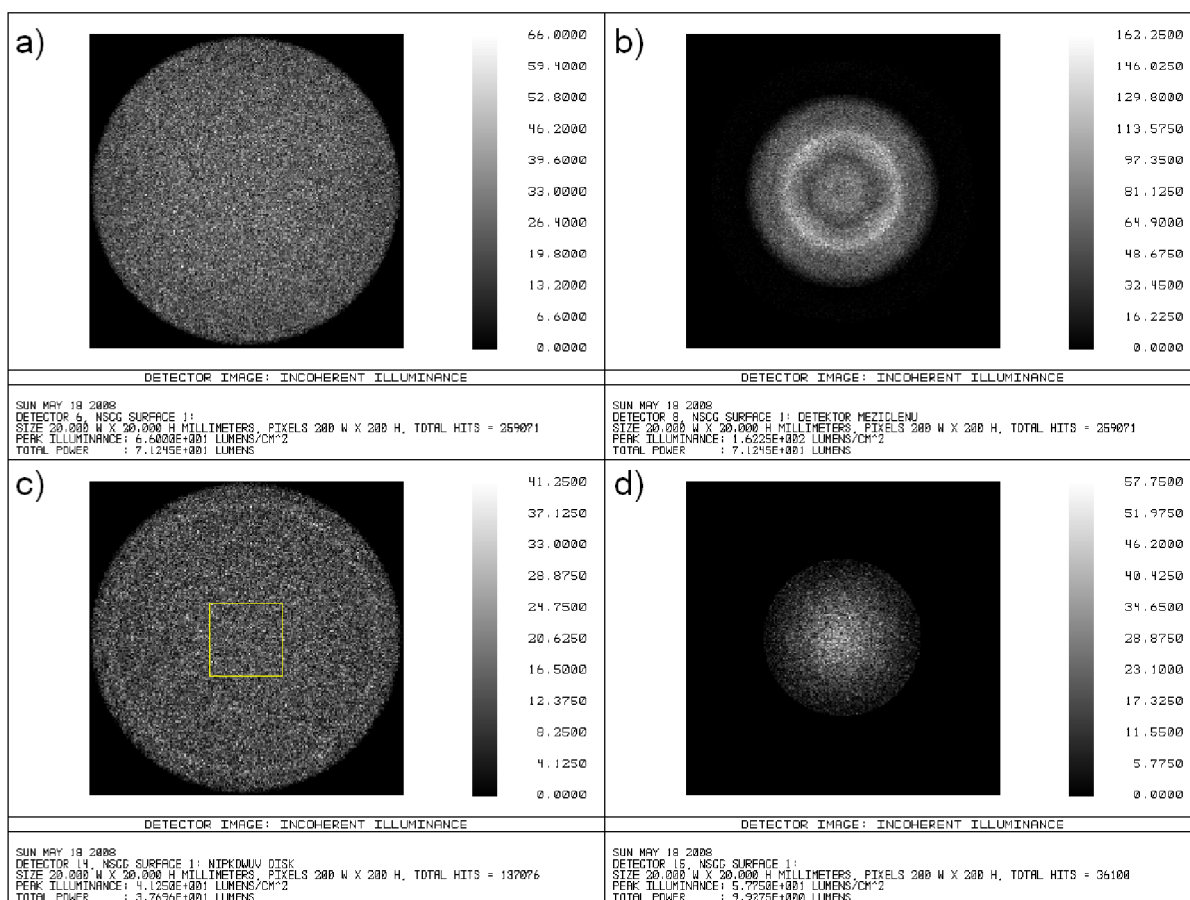


Obr. 39: a) Závislost svítivosti na vyzařovacím úhlu. b) Průběh osvětlení v rovině detektoru.

Pro přenos světla z kolimátoru do soustavy mikroskopu použijeme jednoduchou pomocnou čočku ($R_1 = 50 \text{ mm}$, $R_2 = -50 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$, sklo BK7, $f'_d = 48,7 \text{ mm}$) umístěnou ve vzdálenosti 90 mm za výstupní rovinnou plochou kolimátoru. Takto vznikne



Obr. 40: Sestava s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05 v nesequenčním módu systému ZEMAX.



Obr. 41: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05: a) rovina za pomocnou čočkou, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu. Žlutý čtverec označuje oblast, ze které byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

soustava zobrazená na obr. 40.

Po provedení analýzy této soustavy v systému ZEMAX jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 41). Výpočet byl prováděn trasováním 10^6 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px a rozměrech 20 mm x 20 mm.

Na obr. 35a je zobrazen průběh osvětlení v rovině těsně za pomocnou čočkou. Osvětlení dosahuje maximální hodnoty 66 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 71 lm .

Na obr. 41b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. V této rovině dosahuje osvětlení maximální hodnoty 162 lm/cm^2 . Hodnota světelného toku zde dosahuje 71 lm .

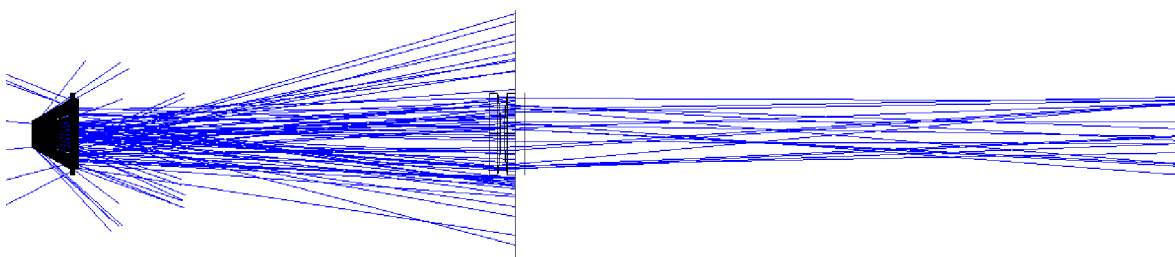
Na obr. 41c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Zde je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 41 lm/cm^2 . Zprůměrováním hodnot části detektoru označené žlutým čtvercem o rozměrech $45 \text{ px} \times 45 \text{ px}$ dostaneme průměrnou hodnotu osvětlení 14 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 38 lm .

Na obr. 41d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Do roviny dopadá světelný tok 10 lm . Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok $0,05 \text{ lm}$.

Osvětlovací soustava využívající kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 tedy dodává do roviny vstupní pupily objektivu 5% světelného toku soustavy s dokonale vycenetrovanou výbojkou.

5.7 Návrh s využitím kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěným v rovině aperturní clonky

Jak již bylo uvedeno v kap. 3, aperturní clonka slouží v soustavě konfokálního mikroskopu mj. k regulaci osvětlení v zorném poli. Světelný tok LED diody však lze dobře regulovat změnou elektrického proudu procházejícího diodou. Proto je možné člen aperturní clonky odebrat a do této roviny umístit zdroj světla, který pak bude osvětlovat rovinu Nipkowova disku a jeho obraz bude polní čočkou přenášen do roviny vstupní pupily objektivu. Aby byla využita většina světelného toku, musí mít zdroj úzkou vyzařovací charakteristiku, tj. musí vyzařovat většinu světelného toku pod co nejmenším úhlem vzhledem k optické ose soustavy. Proto pro tento návrh využijeme kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 popsaný v kap 5.6. Schéma sestavy s kolimátorem umístěným v rovině aperturní clonky je na obr. 42.



Obr. 42: Sestava s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěným v rovině aperturní clonky.

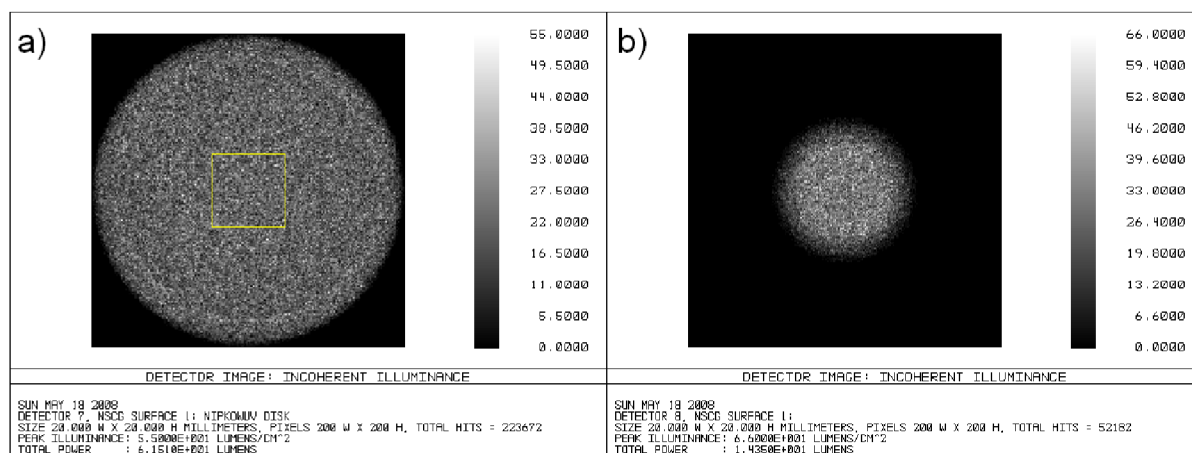
Po provedení analýzy této soustavy v systému ZEMAX jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 43). Výpočet byl prováděn trasováním 10^6 paprsků při rozlišení obou detektorů $200 \text{ px} \times 200 \text{ px}$ a rozměrech $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$.

Na obr. 43a je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Zde je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 55 lm/cm^2 . Zprůměrováním hodnot části detektoru

označené žlutým čtvercem o rozměrech 45 px x 45 px dostaneme průměrnou hodnotu osvětlení 22 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 62 lm.

Na obr. 43b je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Do roviny dopadá světelný tok 14 lm. Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok 0,07 lm.

Osvětlovací soustava využívající kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěný v rovině aperturní clonky tedy dodává do roviny vstupní pupily objektivu 7% světelného toku soustavy s dokonale vycentrovanou výbojkou.



Obr. 43: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěným v rovině aperturní clonky: a) rovina Nipkowova disku, b) rovina vstupní pupily objektivu. Žlutý čtverec označuje oblast, ze které byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

5.8 Porovnání jednotlivých návrhů osvětlovací soustavy

V této kapitole provedeme srovnání jednotlivých návrhů osvětlovací soustavy. Pozornost budeme věnovat především dvěma důležitým rovinám soustavy: rovině Nipkowova disku a rovině vstupní pupily objektivu. Rovina Nipkowova disku je důležitá, neboť je promítána na vzorek. Proto v této rovině budeme sledovat rovnoměrnost osvětlení a jeho průměrnou hodnotu. V rovině vstupní pupily objektivu budeme sledovat hodnotu světelného toku protékajícího touto rovinou. Srovnání je uvedeno v tab. 10, kde název *Kolimátor LUXEON 1* označuje návrh v kap. 5.6 a název *Kolimátor LUXEON 2* označuje návrh v kap. 5.7.

Jak je z výsledků patrné, žádný z výše popisovaných návrhů osvětlovací soustavy není schopen plně nahradit osvětlovací soustavu konfokálního mikroskopu Confocal 2002 využívající vysokotlakou rtuťovou výbojku. Návrhy dosahují od 5% do 10% světelného toku původní soustavy s dokonale vycentrovanou výbojkou. Přitom návrh využívající parabolické zrcadlo je z důvodu nerovnoměrného osvětlení zorného pole nepoužitelný. U návrhů využívajících eliptické zrcadlo nebo kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 jsou patrné vyšší hodnoty osvětlení v rovině Nipkowova disku, které jsou způsobeny parapsky procházejícími touto rovinou, avšak dopadajícími mimo vstupní pupilu objektivu.

Označení návrhu	Průměrné osvětlení v rovině Nipkowova disku [lm/cm^2]	Rovnoměrné osvětlení v rovině Nipkowova disku	Světelný tok vstupní pupilou objektivu [lm]
Výbojka	76	ano	1,00
Parabolické zrcadlo	-	ne	0,10
Eliptické zrcadlo	44	ano	0,08
Čočkový kolektor	7	ano	0,09
Sférický kondenzor	8	ano	0,05
Kolimátor LUXEON 1	14	ano	0,05
Kolimátor LUXEON 2	22	ano	0,07

Tab. 10: Porovnání jednotlivých návrhů osvětlovací soustavy.

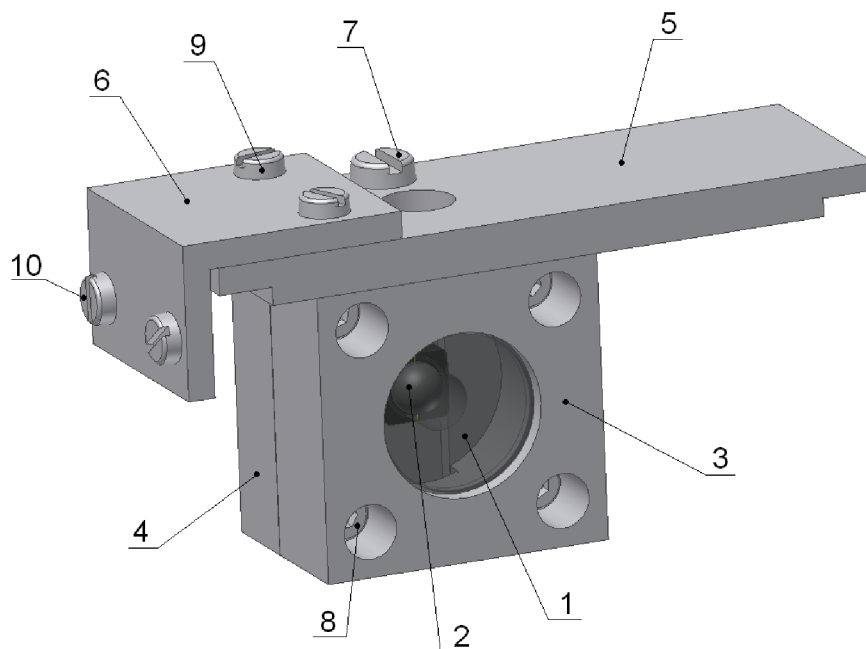
Vzhledem k cenové dostupnosti kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 a jednoduchosti návrhu využívajícího tento kolimátor umístěný v rovině aperturní clonky (viz kap. 5.7) bude v následující kapitole proveden experiment ověřující výsledky analýzy systému ZEMAX.

6 Ověření výsledků analýzy

V této kapitole je proveden jednoduchý experiment pro ověření výsledků analýzy návrhu z kap. 5.7 využívajícího kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěný v rovině aperturní clonky.

6.1 Konstrukční návrh přípravku pro uchycení zdroje

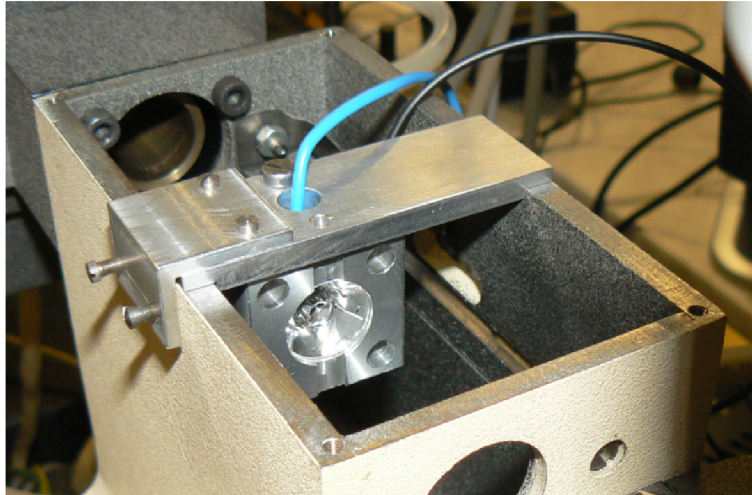
Pro upevnění LED diody s kolimátorem v rovině aperturní clonky byla nejprve navržena konstrukce jednoduchého přípravku, který umožňuje upevnění osvětlovacího systému v domečku mikroskopu. Protože se za provozu dioda zahřívá, byly jednotlivé části navrženy z duralu (AlMgSi0.5), který dobře vede teplo. Celý přípravek pak slouží zároveň jako chladič chránící diodu před přehřátím. Požadavkem na konstrukci přípravku byla možnost základního seřízení polohy osvětlovače vůči optické ose.



Obr. 44: Konečný návrh přípravku pro uchycení kolimátoru s LED diodou (Autodesk Inventor). Popis jednotlivých částí: 1 - kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05, 2 - LED dioda Philips LUXEON K2 TFFC, 3 - přední část úchytu, 4 - zadní část úchytu, 5 - nosník, 6 - úhelník, 7 - šroub M4x16 (ČSN 02 1130), 8 - šroub M3x10 (ČSN 02 1143), 9, 10 - šroub M3x6 (ČSN 02 1130).

Konečný návrh přípravku je na obr. 44. Součásti 3 a 4 slouží ke správnému upevnění diody (2) ve válcovém otvoru kolimátoru (1). Tyto součásti jsou smontovány pomocí čtyř šroubů M3x10 (8). Celek je potom pomocí jediného šroubu M4x16 (7) upevněn k nosníku (5). Toto upevnění dovoluje natáčení zdroje kolem osy šroubu a zároveň nastavení zdroje vůči optické ose ve svislém směru. V nosníku je vyvrtán otvor pro vyvedení vodičů el. proudu. Celý nosník je usazen na domečku mikroskopu (není zobrazen)

a lze posouvat ve směru optické osy. Poloha celého přípravku je zajištěna dvěma šrouby M3x6 (10) o stěnu domečku. Pro experimentální ověření analýzy provedené v kap. 5.7 je tento jednoduchý přípravek dostačující. Výkresová dokumentace přípravku je přiložena k této diplomové práci.



Obr. 45: Fotografie hotového přípravku pro uchycení kolimátoru.

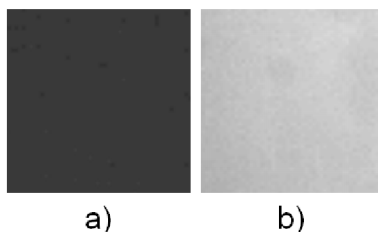
6.2 Experiment

V experimentu byla porovnávána původní sestava s výbojkou a návrh s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěným v rovině aperturní clonky. Z analýz v systému ZEMAX vyplývá, že do vstupní pupily objektivu dopadá světelný tok 1 lm resp. 0,07 lm, tj. zhruba 14x méně světla v případě LED diody. Z důvodu nedostupnosti LED diody Philips LUXEON K2 s označením L XK2-PWC4-0200 v době provádění experimentu byla použita LED dioda L XK2-PW14-U00. Ta dosahuje světelného toku 100 lm při řídicím proudu $I = 1$ A, což je 2,75x méně. Při použití této diody tedy do vstupní pupily objektivu dopadá světelný tok 0,03 lm, tj. přibližně 33x méně než bylo vypočteno v případě výbojky.

Experiment byl proveden následujícím způsobem. Do rovnoměrně osvětlené roviny vzorku objektivem Meopta 10x, $NA = 0,30$ byl umístěn čip černobílé CCD kamery Watec LCL-902K. Snímáno bylo osvětlení této roviny s expozičním časem 1/60 s. Aby nedocházelo k přexponování snímků, byl použit šedý filtr Thorlabs ND30A s propustností $T = 0,001$. Výřezy z pořízených snímků o rozměrech 100 px x 100 px jsou na obr. 46. Ačkoliv byla očekávána 33x nižší intenzita světla LED diody oproti výbojce v důsledku menšího množství dopadajícího světla, zprůměrováním hodnot intenzity z výřezů byl získán poměr

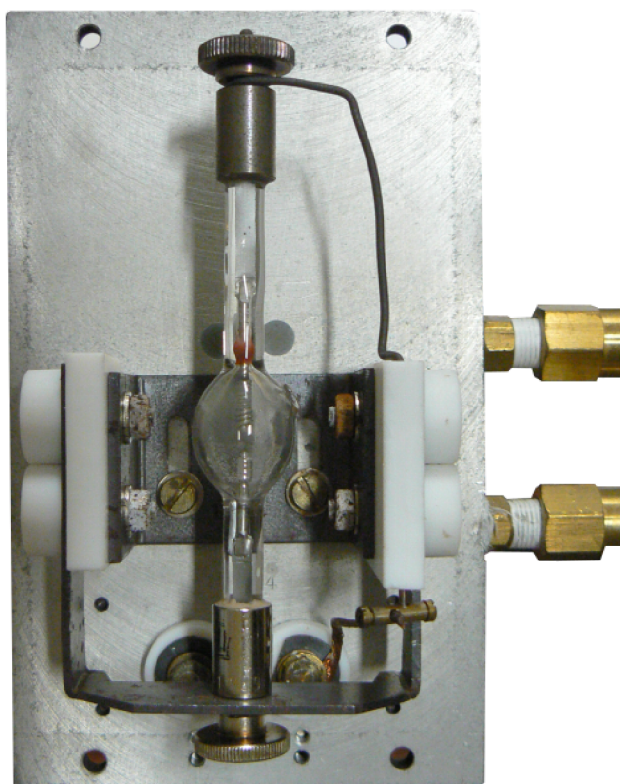
$$\frac{I_r^{vybojka}}{I_r^{LED}} = \frac{0,78}{0,22} \doteq 3,5. \quad (24)$$

Měřením jsme tedy určili, že do roviny vzorku dopadá při osvětlení LED diodou 3,5x méně světla. Tato hodnota se nezanedbatelně liší od našeho předpokladu. Při hledání



Obr. 46: Porovnání osvětlení roviny vzorku a) LED diodou a b) výbojkou.

příčin tohoto rozporu bylo shledáno, že výbojka není správně umístěna na optické ose a obraz výbojky v rovině aperturní clonky je tedy posunutý směrem od optické osy. Celá optická soustava je přitom citlivá na správnou polohu zdroje a již při jeho malé výchylce vůči optické ose tak dochází ke značnému úbytku světla. Dále bylo shledáno, že rozměry skutečného výboje neodpovídají rozměrům modelu vycházejícího z údajů poskytnutých výrobcem rtuťové výbojky. To může být způsobeno idealizovanými údaji uvedenými v technické dokumentaci výrobce a také stárnutím výbojky. Model sestavy s výbojkou popisovaný a analyzovaný v kap. 4.2 tedy není pro porovnání vhodný, neboť neodpovídá skutečnému stavu v době provádění experimentu.



Obr. 47: Úchyt výbojky mikroskopu Confocal 2002.

V ideálním případě by osvětlení zorného pole mikroskopu při využití rtuťové výbojky a přesném seřízení její polohy mohlo dosahovat výrazně vyšších hodnot než ve

skutečnosti. Protože však musí být výbojka za provozu uzavřena v domečku, není možné její polohu seřizovat za chodu mikroskopu, což výrazně znesnadňuje proces seřizování. Úchyt výbojky (obr. 47) navíc umožňuje malé korekce polohy pouze ve svislém směru (ve vodorovném směru je poloha pevně dána). Postup při seřizování polohy výbojky je následující:

- zapnutí vodního chlazení,
- zapnutí výbojky,
- zjištění směru vychýlení obrazu výbojky v rovině aperturní clonky,
- vypnutí výbojky,
- vyčkání asi 3 min do vychladnutí výbojky,
- vypnutí vodního chlazení,
- odmontování zadní části domečku,
- seřízení polohy výbojky v patřičném směru,
- přišroubování zadní části domečku.

Tento postup je nutné několikrát opakovat, opětovné zapínání a vypínání však snižuje životnost drahé výbojky. Seřizování je navíc časově náročné a vlivem opotřebování elektrod výbojky také nestabilní. Ve skutečnosti je proto při výměně výbojky provedeno jen omezené množství kroků a mikroskop je tedy provozován při osvětlení zdrojem, jehož poloha není přesně seřizena a během života výbojky se mění. Jak je patrné z grafu na obr. 48, již vychýlení zdroje o 1 mm v obou osách způsobí snížení světelného toku vstupní pupilou objektivu na 32% maximální hodnoty.

Po provedení nové analýzy soustavy s výbojkou, jejíž rozměry výboje i poloha vůči optické ose odpovídají skutečné soustavě analyzované v této kapitole, jsou výsledky zobrazeny v okně *Detector Viewer* (obr. 49). Výpočet byl proveden trasováním 10^7 paprsků při rozlišení všech detektorů 200 px x 200 px a rozměrech 20 mm x 20 mm.

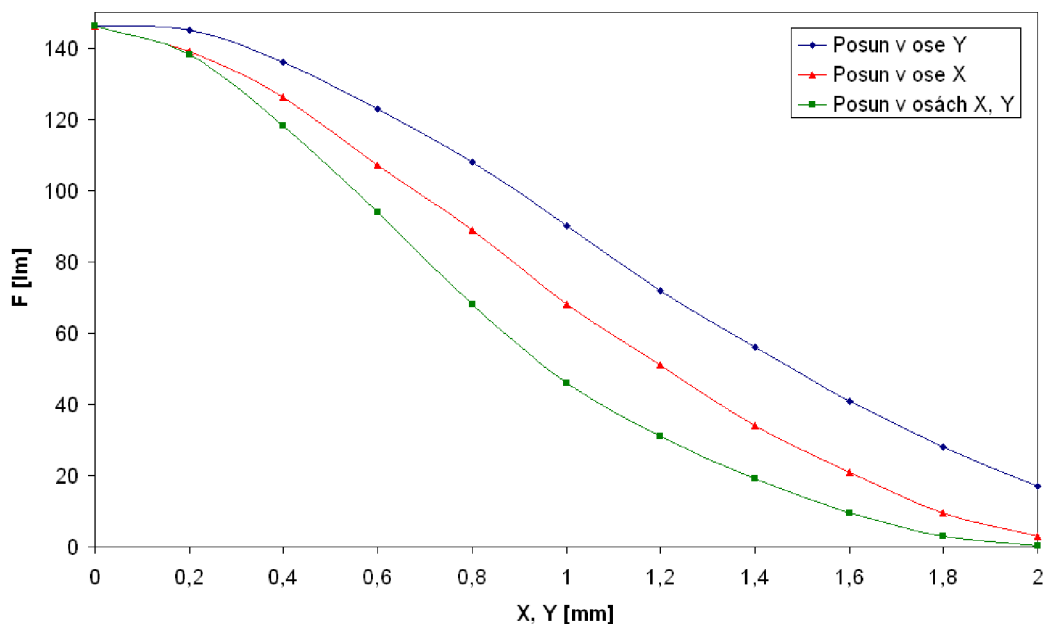
Na obr. 49a je zobrazen průběh osvětlení v rovině za kolektorem. V této rovině jsou zřetelné prstence, jejichž vznik byl diskutován již v kap. 4.2. Rovinou prochází světelný tok 263 lm.

Na obr. 49b je zobrazen průběh osvětlení v rovině aperturní clonky. V této rovině je patrný obraz výboje posunutý vůči optické ose. Osvětlení dosahuje maximální hodnoty 941 lm/cm^2 a rovinou protéká světelný tok 227 lm.

Na obr. 49c je zobrazen průběh osvětlení v rovině Nipkowova disku. Zde je osvětlení rovnoměrné s maximální hodnotou 133 lm/cm^2 . Zprůměrováním hodnot části detektoru označené žlutým čtvercem o rozměrech 45 px x 45 px dostaneme průměrnou hodnotu osvětlení 34 lm/cm^2 . Rovinou prochází světelný tok 99 lm.

Na obr. 49d je zobrazen průběh osvětlení v rovině vstupní pupily objektivu. Rovinou prochází světelný tok 32 lm. Po započtení propustnosti Nipkowova disku a polopropustného členu dostáváme světelný tok 0,16 lm.

Hodnota světelného toku vstupní pupilou objektivu reálné soustavy analyzované v této kapitole je zhruba 4,6x menší než v ideálním případě dokonale seřizené osvětlovací soustavy. Do roviny vzorku tedy podle analýzy dopadne zhruba 6,3x méně světla v případě osvětlení LED diodou. Tato hodnota je závislá na průměru vstupní pupily, který



Obr. 48: Průběh světelného toku F vstupní pupilou objektivu v závislosti na poloze výbojky vůči optické ose. Data byla získána z analýz v systému ZEMAX změnou polohy výbojky v ose X, Y a najednou v obou osách (trasováno 10^6 paprsků).

u použitého objektivu neznáme a v analýze je proto použit průměr $D_{VP} = 10$ mm. Přesto tento poměr již lépe odpovídá výsledkům experimentu.

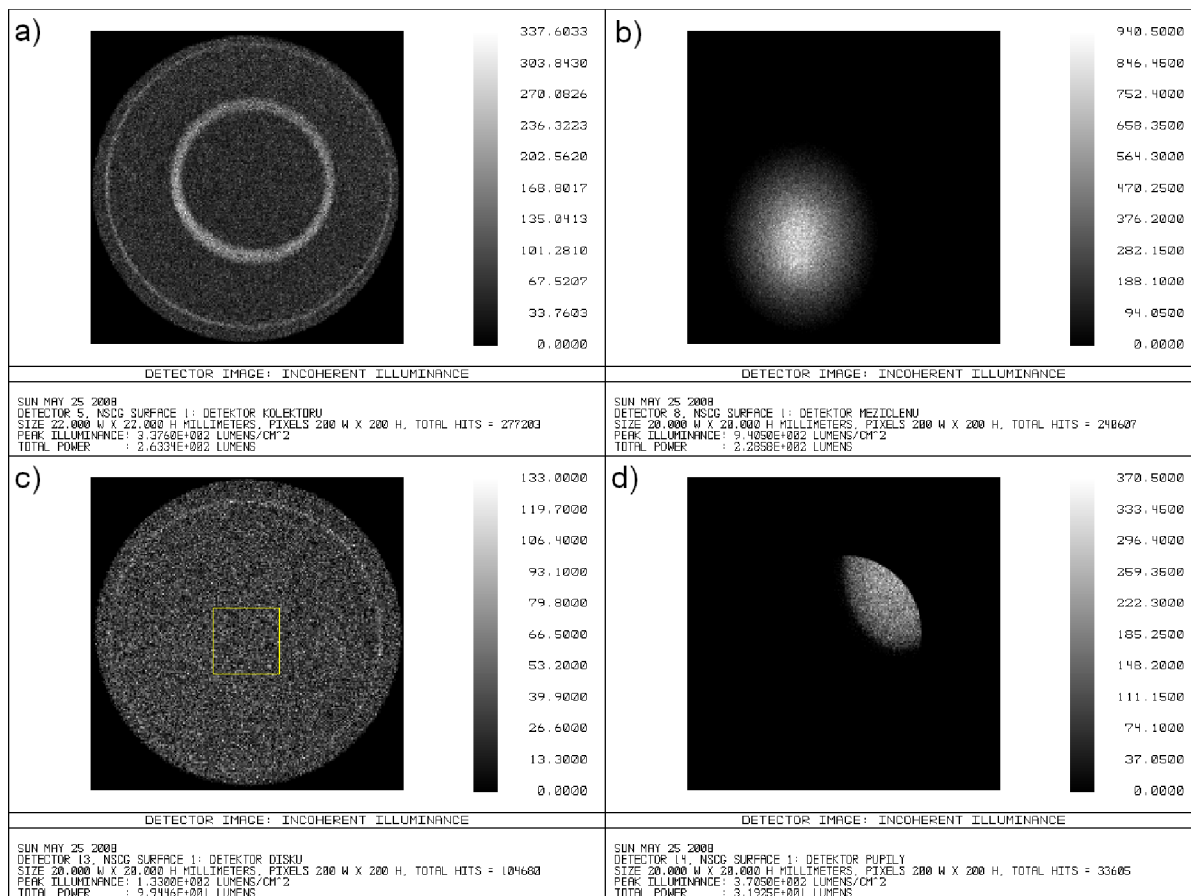
6.3 Pozorování

V této kapitole jsou popsána jednotlivá pozorování provedená pro srovnání původního a navrženého osvětlovacího systému.

Všechna pozorování byla prováděna pomocí barevné digitální kamery Olympus DP50 při citlivosti ISO 100 a rozlišení obrazu 1392 px x 1040 px. Použit byl objektiv Meopta 10x, NA = 0,30. Pozorování bylo nejprve prováděno při osvětlení s LED diodou (LXK2-PW14-U00) a poté s vysokotlakou rtuťovou výbojkou. Dioda byla napájena řídicím proudem $I = 1$ A.

Při prvním pozorování byla z důvodu očekávané nižší intenzity světla jako pozorovaný vzorek zvolena odrazná plocha zrcátka. Pořízena byla série snímků s expozičními časy v rozsahu ($1/4 \div 5$) s. Stejná série snímků byla poté pořízena i při osvětlení výbojkou. Porovnání výřezů vybraných snímků je na obr. 50. Poté byl pomocí programu **Průměrná intenzita** vyvinutého v prostředí Delphi (viz Přílohy) proveden výpočet průměrné intenzity z výřezů jednotlivých snímků o velikosti 200 px x 200 px a výsledky vyneseny do grafu (obr. 51). Z grafu je patrné, že průměrná intenzita snímků pořízených při osvětlení je přibližně 2x až 1,5x nižší než v případě osvětlení výbojkou.

Při druhém pozorování byla pořízena série snímků stejného místa stejného vzorku s expozičním časem 2,5 s při postupném přeastřování. Přeastřování bylo prováděno mikroposuvem stolku mikroskopu s krokem $5 \mu\text{m}$. Vybrané výřezy (200 px x 200 px) z po-



Obr. 49: Analýza osvětlení v různých rovinách soustavy s výbojkou umístěnou v poloze $X = 1,1$ mm, $Y = 1,3$ mm: a) rovina za kolektorem, b) rovina aperturní clonky, c) rovina Nipkowova disku, d) rovina vstupní pupily objektivu. Žlutý čtverec označuje oblast, ze které byla stanovena hodnota průměrného osvětlení.

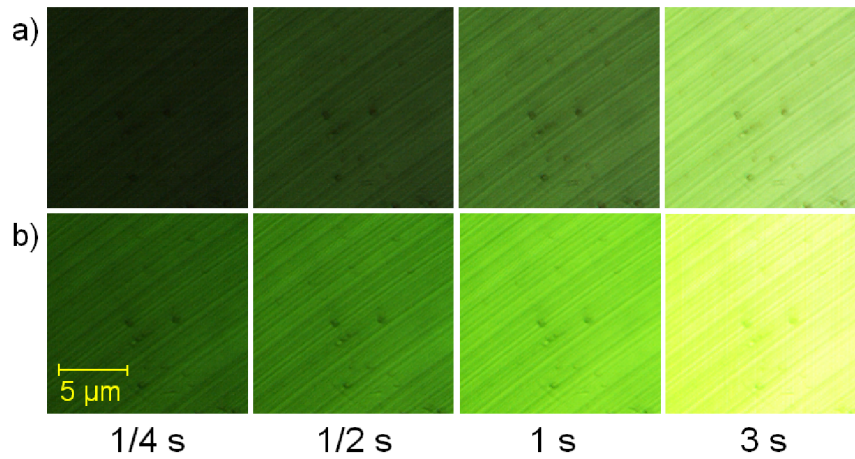
řízené série snímků jsou pro porovnání zobrazeny na obr. 52. Pokud opět provedeme výpočet průměrné relativní intenzity jednotlivých výřezů v závislosti na relativní hloubce, dostaneme tzv. osovou intenzitní odezvu mikroskopu ([2], str. 38–39; viz obr. 53). Z grafu je patrné, že osová intenzitní odezva má v případě osvětlení LED diodou rovnoměrnější průběh.

Při posledním pozorování byl jako vzorek zvolen povrch mince. Osvětlován byl nejprve LED diodou při řídicích proudech $I = 1$ A a $I = 1,5$ A, poté bylo osvětlováno výbojkou. Expoziční čas kamery byl nastaven na 2,5 s. Při krátkodobém zvýšení řídicího proudu na $I = 1,5$ A dojde ke zvýšení světelného toku diody, avšak tento režim není použitelný dlouhodobě, neboť při dlouhodobém provozování diody na tomto proudu dochází k trvalé ztrátě výkonu a snižování životnosti diody. Výřezy z pořízených snímků jsou na obr. 54 a hodnoty průměrné relativní intenzity jednotlivých snímků na obr. 55.

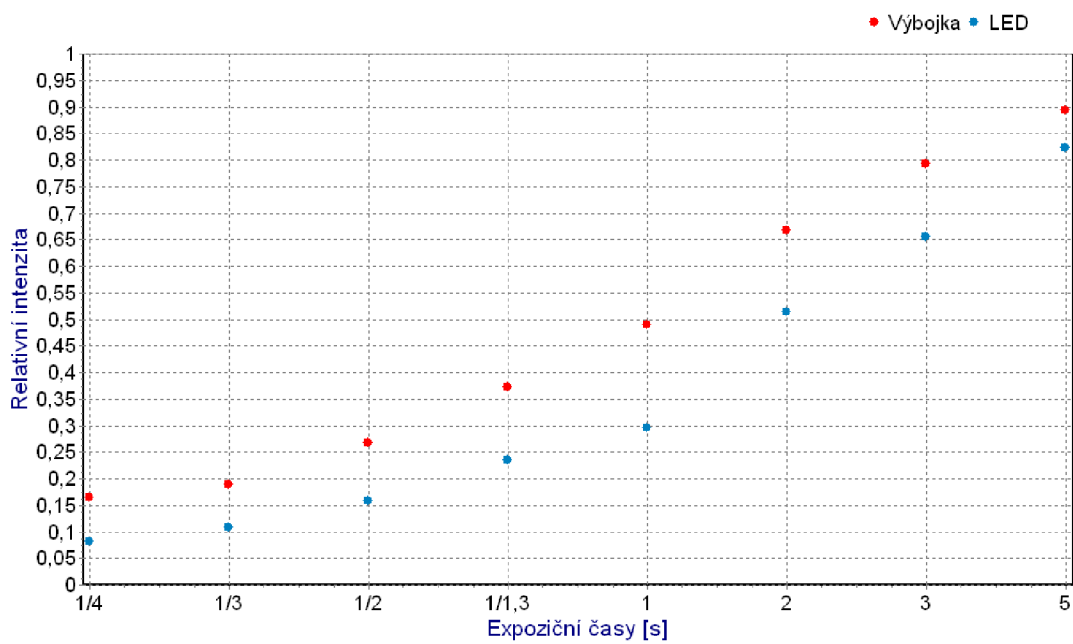
Protože byl mikroskop navržen především pro pozorování lidským okem, je vhodné se zmínit také o subjektivním vnímání obrazu pozorovatelem. Na kameře lze totiž nastavit vhodnou expoziční dobu pro získání dostatečně osvětleného snímku, avšak lidské oko

tuto možnost nemá. Při využití LED diody bylo osvětlení zorného pole pro pohodlné pozorování jednotlivých detailů okem dostatečné, avšak pozorování méně odrazivého povrchu mince již bylo pro pozorovatele nepříjemné z důvodu nízké hodnoty osvětlení. Při použití výbojky bylo osvětlení povrchu mince dostatečné. Negativní vlastností je však nestálost výboje, která způsobuje nepříjemné blikání a při dlouhodobém pozorování unavuje oko. Tuto vlastnost LED diody nemají, světelný tok diody je stálý.

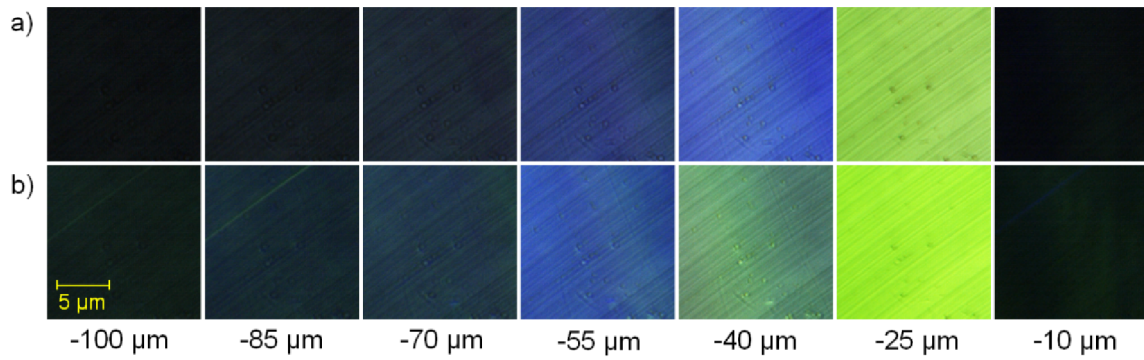
V této kapitole tedy docházíme k překvapivému závěru, že návrhy provedené v kapitolách 5.2–5.7 budou zvláště s využitím výkonnější LED diody L XK2-PWC4-0200 pro osvětlení konfokálního mikroskopu Confocal 2002 vhodné, neboť tato dioda poskytuje oproti diodě použité v experimentu 2,75x vyšší světelný tok. Z důvodu cenové dostupnosti kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 a konstrukční jednoduchosti soustavy využívající tento kolimátor umístěný v rovině aperturní clonky (viz kap. 5.7) bude vhodným konečným řešením osvětlovací soustavy právě tento návrh. Jeho výhodou bude také možnost přesného seřízení polohy zdroje vůči optické ose za chodu mikroskopu.



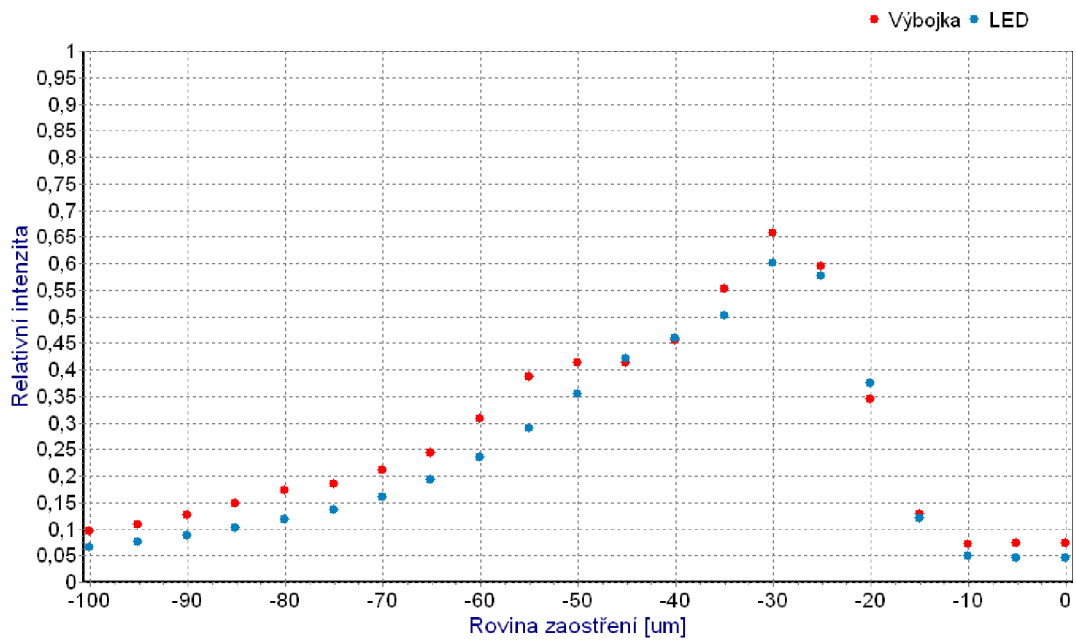
Obr. 50: Porovnání osvětlení zorného pole při různých expozičních časech. Osvětlení a) LED diodou, b) výbojkou.



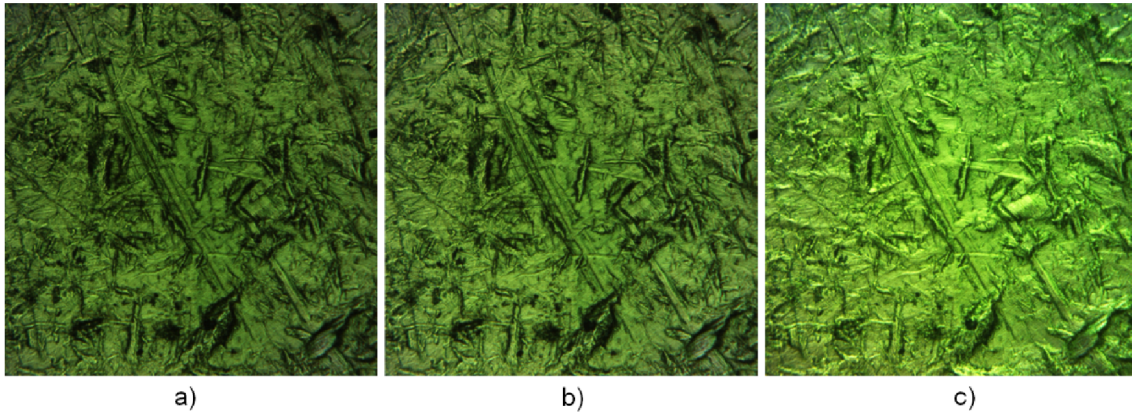
Obr. 51: Hodnoty průměrné relativní intenzity získané z výřezů pořízených snímků.



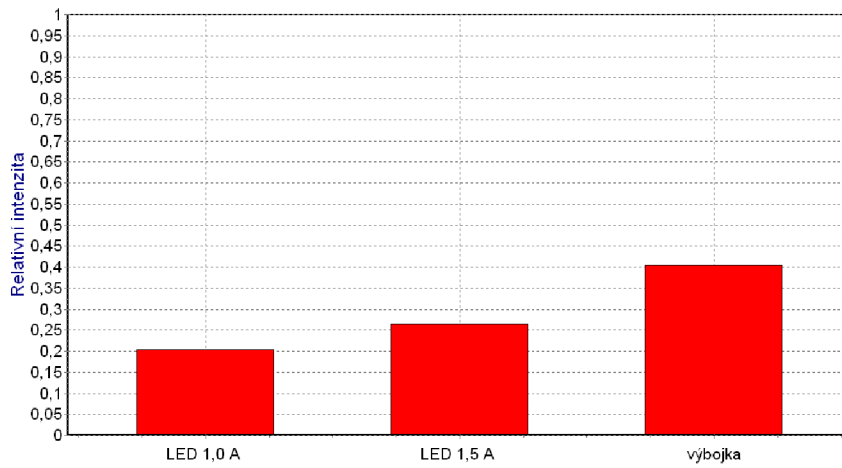
Obr. 52: Porovnání osvětlení zorného pole při různých rovinách zaostření. Osvětlení a) LED diodou, b) výbojkou.



Obr. 53: Porovnání osové intenzitní odezvy mikroskopu při osvětlení LED diodou a výbojkou.



Obr. 54: Povrch mince při osvětlení a) LED diodou při $I = 1 \text{ A}$, b) LED diodou při $I = 1,5 \text{ A}$ a c) výbojkou.



Obr. 55: Hodnoty průměrné relativní intenzity při osvětlení LED diodou a výbojkou.

7 Závěr

V první části diplomové práce byly nejprve diskutovány vlastnosti využívaných a alternativních zdrojů světla pro konfokální mikroskop s duálním rastrováním a zváženy možnosti využití alternativních zdrojů v osvětlovací soustavě. Následně byly měření získány parametry vybraných optických prvků mikroskopu. Celá optická soustava byla převedena do systému ZEMAX, kde byla dále analyzována. Fotometrické analýzy byly prováděny v nesequenčním módu systému ZEMAX pomocí trasování paprsků.

V druhé části byla nejprve jako zdroj vybrána vysoce výkonná LED dioda Philips LUXEON K2 TFFC. Výběr byl proveden především na základě výhodných vlastností LED diod, kterými jsou jejich malé rozměry, vysoká světelná účinnost a nízká spotřeba. Poté byly provedeny jednotlivé návrhy osvětlovací soustavy s využitím této diody a jejich analýzy v systému ZEMAX. Následně byly návrhy porovnány se stávající soustavou využívající výbojku. Všechny návrhy dosahovaly 5%–10% světelného toku původní soustavy s centrovanou výbojkou. Při porovnání se skutečnou soustavou v dalších kapitolách bylo zjištěno, že tyto návrhy jsou vhodné pro osvětlovací soustavu konfokálního mikroskopu Confocal 2002 při využití LED diody s označením L XK2-PWC4-0200 s výjimkou návrhu s parabolickým zrcadlem, které vytváří nerovnoměrné osvětlení vzorku.

V poslední části byl proveden experiment ověřující výsledky analýz systému ZEMAX z kap. 5.7. K tomu účelu byla nejprve navržena konstrukce jednoduchého přípravku pro uchycení kolimátoru v domečku mikroskopu. Při vyhodnocení experimentu bylo zjištěno, že optická soustava využívající výbojku je velice citlivá na správné umístění zdroje vůči optické ose a již při malém vychýlení dochází k výrazným ztrátám světla. Seřizování polohy zdroje je přitom náročné a podstatně snižuje životnost drahé výbojky. Poloha zdroje je navíc vlivem stárnutí výbojky nestabilní. Proto je mikroskop provozován při osvětlení výbojkou, jejíž poloha není dostatečně přesně seřizena a v soustavě tedy dochází ke ztrátám. Z toho důvodu se návrhy osvětlovací soustavy využívající jako zdroj světla LED diodu mohou vyrovnat osvětlovací soustavě využívající vysokotlakou rtuťovou výbojku. Úspěšně byla provedena pozorování povrchů zrcátka a mince při osvětlení LED diodou. Jako výsledné konstrukční řešení byl z důvodu cenové dostupnosti a konstrukční jednoduchosti vybrán návrh využívající kolimátor Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěný v rovině aperturní clonky, který umožňuje přesné seřízení polohy zdroje vůči optické ose. Vzhledem k rychlému tempu vývoje LED diod a stálému zvyšování jejich světelného toku a účinnosti návrh osvětlovací soustavy využívající LED diodu zřejmě v blízké době plně nahradí dosud využívanou osvětlovací soustavu s vysokotlakou rtuťovou výbojkou. Práce s mikroskopem tak bude jednodušší a konstrukce celého mikroskopu kompaktnější.

V rámci diplomové práce byly vyvinuty tři jednoduché programy usnadňující vyhodnocení analýz v systému ZEMAX, konstrukční návrhy osvětlovací soustavy a zpracování obrazových dat pořízených při pozorování.

Literatura

- [1] MINSKY, M.: Microscopy apparatus. United States Patent Office, Patent No. 3013467.
- [2] WILSON, T.: *Confocal microscopy*. London: Academic Press, 1989. 426 p. ISBN 0-12-757270-8.
- [3] GEORGE, N.: Confocal microscope systems - A comparison of technologies. *Bioscience Technology*, 2003, vol. 6, no. 11, p. 12–14. ISSN 0192-1266.
- [4] PETRÁŇ, M., HADRAVSKÝ, M.: Tandem-Scanning Reflected-Light Microscope. *Journal of the Optical society of America*, 1968, vol. 58, no. 5, p. 661–664.
- [5] PETRÁŇ, M., HADRAVSKÝ, M.: Method and arrangement for improving the resolving power and contrast. United States Patent Office, Patent No. 3517980.
- [6] <http://cs.wikipedia.org/wiki/LED> (květen 2008).
- [7] PETRÁŇ, M., HADRAVSKÝ, M., BOYDE, A.: The Tandem Scanning Reflected Light Microscope. *Scanning*, 1985, vol. 7, no. 2, p. 97–108. ISSN 0161-0457.
- [8] ZEMAX Optical Design Program User's Guide. ZEMAX Development Corporation, February 2005.
- [9] HAVELKA B.: *Geometrická optika I*. Praha: ČSAV, 1955. 344 s.
- [10] <http://www.lumileds.com> (květen 2008).
- [11] LUXEON K2 with TFFC (Technical Datasheet DS60). Philips Lumileds Lighting Company, 2007.
- [12] BORN, M., WOLF, E.: *Principles of Optics*. 7th Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p. ISBN 0-521-64222-1.
- [13] CHI, W., GEORGE, N.: Light-emitting diode illumination design with a condensing sphere. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, vol. 23, no. 9, p. 2295–2298. ISSN 1084-7529.
- [14] CHI, W., GEORGE, N.: Illumination system with a condensing sphere. World Intellectual Property Organization, International Application Number PCT/US2006/025145, 2007. Dokument dostupný na URL <http://www.wipo.int> (květen 2008).
- [15] LUXEON Collimator LXHL-NX05 (Technical Datasheet DS26). Philips Lumileds Lighting Company, 2006.

Seznam příloh

Obsah kompaktního disku

Přílohou diplomové práce je kompaktní disk se zdrojovými soubory ZEMAXu, programy v Delphi pro vyhodnocení analýz ZEMAXu a výkresovou dokumentací. Hlavní adresář kompaktního disku obsahuje následující adresáře a soubory:

- AutoCAD
Adresář obsahuje výkresovou dokumentaci úchytu kolimátoru ve formátu DWG.
- Delphi
Adresář obsahuje zdrojové kódy a soubory programů *Výpočty ZEMAX*, *Integrace a Průměrná intenzita*. Jednotlivé programy jsou podrobněji popsány v kap. Přílohy.
- Inventor
Adresář obsahuje soubory 3D modelu úchytu kolimátoru ve formátu programu Autodesk Inventor.
- ZEMAX
Adresář obsahuje následující zdrojové soubory jednotlivých analýz optických soustav ve formátu programu ZEMAX.

<code>eli_anal_ns.ZMX</code>	Analýza ztrátového světla eliptického zrcadla (kap. 5.3).
<code>eli_pap_ns.ZMX</code>	Zobrazení mimoosového bodu eliptickým zrcadlem (kap. 5.3).
<code>elipsa_schema_ns.ZMX</code>	Zobrazení bodového zdroje eliptickým zrcadlem (kap. 5.3).
<code>kolektor_ns.ZMX</code>	Analýza osvětlení rovinné plochy kolektoru (kap. 3).
<code>kolektor_seq.ZMX</code>	Analýza parametrů kolektorového členu (kap. 4.3).
<code>kolimator.stl</code>	Model kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 ve formátu STL (kap. 5.6 a 5.7).
<code>kolimator_ns.ZMX</code>	Analýza kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 (kap. 5.6).
<code>par_anal_ns.ZMX</code>	Analýza ztrátového světla parabolického zrcadla (kap. 5.2).
<code>parabola_schema_ns.ZMX</code>	Zobrazení bodového zdroje parabolickým zrcadlem (kap. 5.2).
<code>sestava_elipsa_ns.ZMX</code>	Analýza sestavy s eliptickým zrcadlem (kap. 5.3).
<code>sestava_kolektor_ns.ZMX</code>	Analýza sestavy s čočkovým kolektorem (kap. 5.4).
<code>sestava_kolimator1_ns.ZMX</code>	Analýza sestavy s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05 (kap. 5.6).

<code>sestava_kolimator2_ns.ZMX</code>	Analýza sestavy s kolimátorem Philips LUXEON LXHL-NX05 umístěným v rovině aperturní clonky (kap. 5.7).
<code>sestava_ns.ZMX</code>	Analýza původní sestavy s výbojkou (kap. 4.2).
<code>sestava_parabola_ns.ZMX</code>	Analýza sestavy s parabolickým zrcadlem (kap. 5.2).
<code>sestava_seq.ZMX</code>	Analýza původní sestavy s výbojkou v sekvenčním módu (kap. 3.1).
<code>sestava_shifted.ZMX</code>	Analýza původní soustavy s výbojkou upravené podle skutečného stavu (kap. 6.2).
<code>sestava_sphere_ns.ZMX</code>	Analýza sestavy se sférickým kondenzorem (kap. 5.5).
<code>sestava_sphere_seq.ZMX</code>	Analýza sestavy se sférickým kondenzorem v sekvenčním módu (kap. 5.5).

Výkresová dokumentace

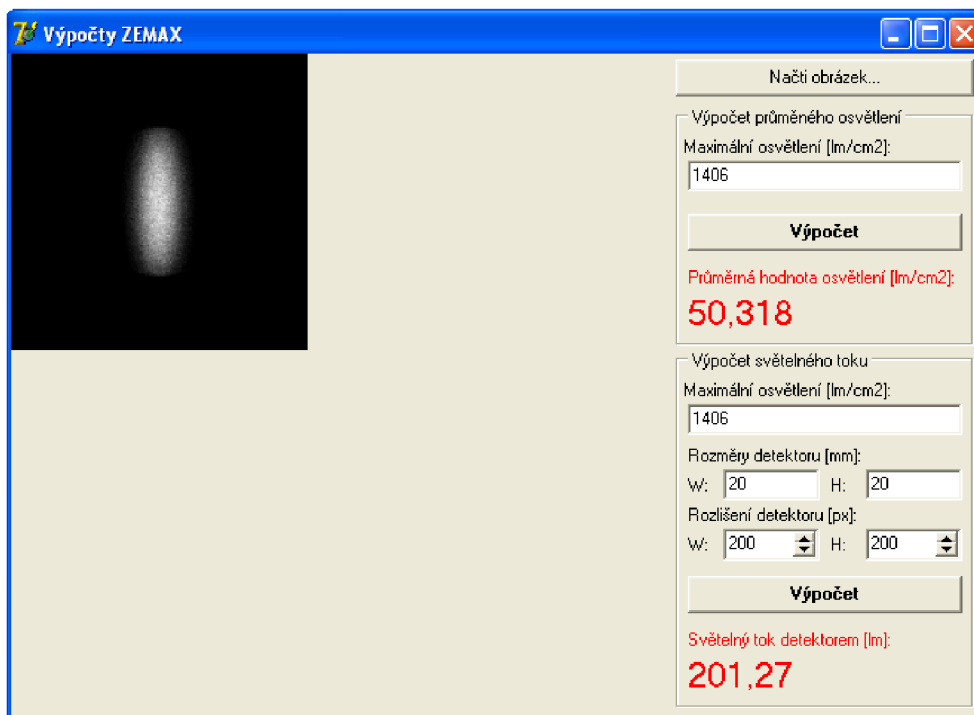
Přílohou diplomové práce je následující výkresová dokumentace úchytu kolimátoru Philips LUXEON LXHL-NX05 (kap. 6.1).

4-00	ÚCHYT KOLIMÁTORU – SESTAVA
4-01	PŘEDNÍ ÚCHYT
4-02	ZADNÍ ÚCHYT
4-03	NOSNÍK
4-04	ÚHELNÍK
K-4-00	KUSOVNÍK

Přílohy

Program Výpočty ZEMAX

Program Výpočty ZEMAX byl vytvořen v programovacím prostředí Delphi. Je určen pro výpočet průměrného osvětlení detektoru a světelného toku detektorem. Vstupem programu jsou obrazová data detektoru generovaná programem ZEMAX ve formátu BMP ve stupních šedi (tzv. *Inv. Grey Scale*, viz obr. 56).



Obr. 56: Náhled programu Výpočty ZEMAX.

Jedinou zadávanou hodnotou při výpočtu průměrného osvětlení je maximální hodnota osvětlení odpovídající hodnotě pixelu: 255 (tj. bílá barva). Tuto hodnotu udává ZEMAX v položce *Peak Illuminance*. Po zadání této hodnoty a spuštění výpočtu je zobrazen výsledek.

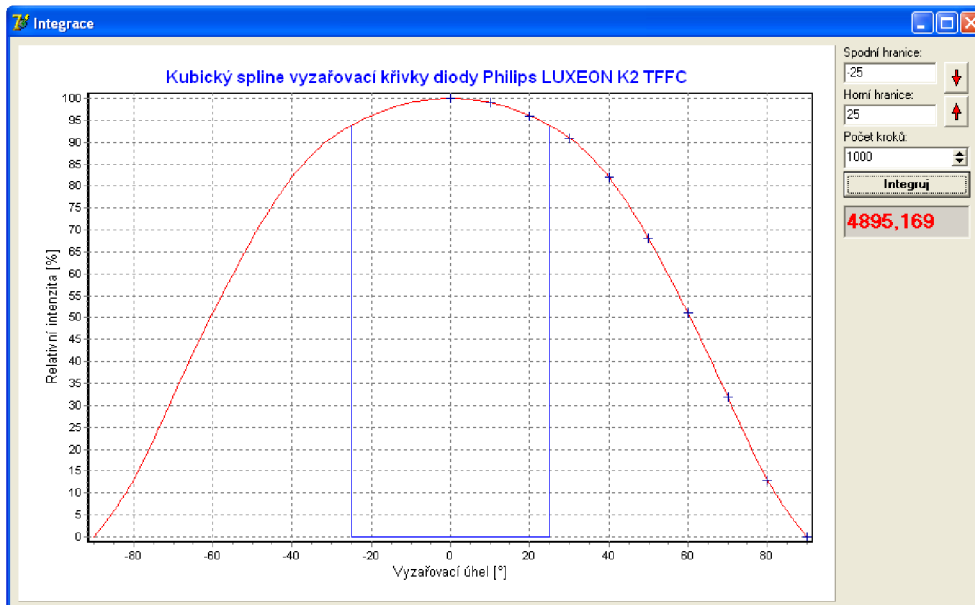
Při výpočtu světelného toku detektorem je zapotřebí zadat maximální hodnotu osvětlení, rozměry detektoru a jeho rozlišení. Tyto hodnoty udává ZEMAX v položkách *Peak Illuminance*, *Size* a *Pixels*. Po zadání těchto hodnot a spuštění výpočtu je zobrazen výsledek.

Program včetně zdrojových kódů je součástí přiloženého kompaktního disku a nachází se ve složce *Delphi* v kořenovém adresáři disku.

Program Integrace

Program *Integrace* byl vytvořen v programovacím prostředí Delphi. Je určen pro výpočet obsahu plochy pod vyzářovací křivkou LED diody Philips LUXEON K2 TFFC

(obr. 14) definované kubickým splinem v kap. 5.1 (obr. 15). Výpočet je realizován pomocí obdélníkové metody s volbou počtu kroků a mezí integrace. Program byl využit v kap. 5.2 a 5.3 k určení podílu ztrátového světla parabolického a eliptického zrcadla. Náhled programu je na obr. 57.



Obr. 57: Náhled programu Integrace.

Po zadání libovolných mezí integrace v intervalu $(-90^\circ, 90^\circ)$ a volbě počtu kroků obdélníkové metody je výpočet spuštěn tlačítkem **Integruj**. Výsledek integrace je zobrazen v kolonce pod tlačítkem. Přesnost výpočtu je možné sledovat postupnou změnou počtu kroků. Meze provedeného výpočtu jsou zobrazeny modrými čarami na vyzařovací křivce diody.

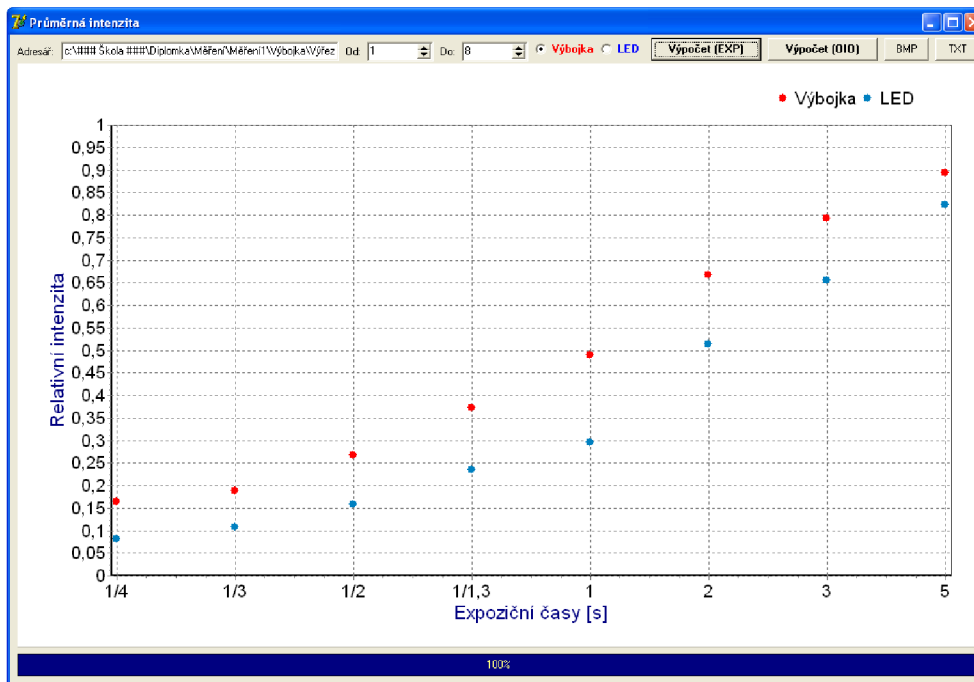
Program včetně zdrojových kódů je součástí přiloženého kompaktního disku a nachází se ve složce **Delphi** v kořenovém adresáři disku.

Program Průměrná intenzita

Program **Průměrná intenzita** byl vytvořen v programovacím prostředí Delphi. Je určen pro výpočet průměrné intenzity snímků získaných digitální kamerou Olympus DP50 v experimentu v kap. 6.3. Výstupní hodnota relativní intenzity je získána zprůměrováním všech bodů obrazu podle vztahu

$$I_r = \frac{1}{255 \cdot W \cdot H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H \frac{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}{3}, \quad (25)$$

kde W je šířka obrazu v px, H je výška obrazu v px a R, G, B jsou barevné kanály jednotlivých bodů obrazu nabývající hodnot 0–255. Vypočtené hodnoty jsou prezentovány formou grafu. Program umožňuje uložení grafu ve formátu BMP a export vypočtených dat do textového souboru. Náhled programu je na obr. 58.



Obr. 58: Náhled programu Průměrná intenzita.

Po zadání adresáře, ve kterém jsou snímky uloženy, a volbě grafu, do kterého mají být hodnoty průměrné relativní intenzity vyneseny, lze stiskem tlačítka Výpočet zahájit proceduru zpracovávající obrazová data. Vypočtené hodnoty jsou vyneseny do zvoleného grafu.

Program včetně zdrojových kódů je součástí přiloženého kompaktního disku a nachází se ve složce Delphi v kořenovém adresáři disku.