

Informace č. 18/2013
NRL pro neionizující elektromagnetická pole a záření

Expozice záření laseru a její rizika

Úvod

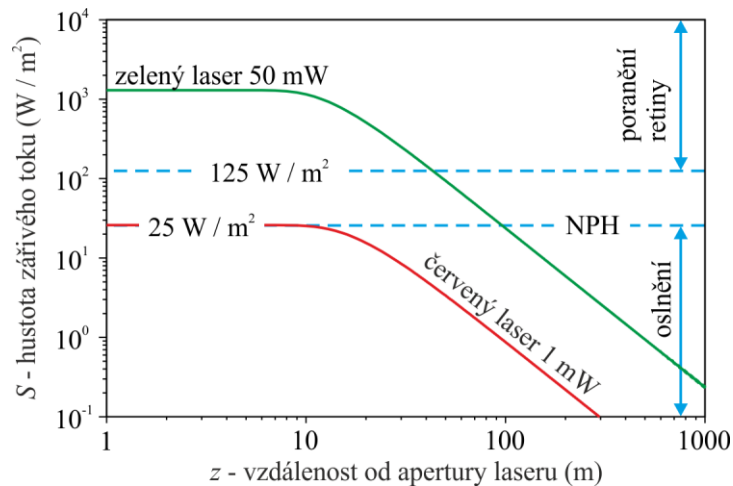
Laserové zdroje světla se v posledních zhruba dvaceti letech stále častěji používají pro vytváření zajímavých i ohromujících světelných efektů. Výkonné lasery vhodné pro podobná předvádění jsou nyní cenově dostupné a opatřil si je již značný počet lidí. Riziko poškození zraku zářením laseru se tím podstatně zvětšilo, protože osoby, které využívají lasery k zábavě, nemusí mít o rizicích, která jsou s používáním těchto zdrojů světla spojena, dostatečně hluboké povědomí.

Pokud jde o ochranu před trvalým poškozením zraku, byla již v minulém století vypracována pravidla, jejichž dodržení zaručuje, že při práci s lasery k poškození očí nedojde [1-3], a ve většině technicky vyspělých států jsou dnes pro expozici očí laserovému záření zavedeny závazné limity [4-6]. Pro ochranu před rizikem, které představuje oslnění očí laserem, však zatím závazná pravidla stanovena nebyla. Oslnění, při kterém expozice oka nepřekročí limit (nejvyšší přípustnou hodnotu, NPH) stanovený pro ochranu zraku, sítnici oka nepoškodí. Nejvyšší přípustné hodnoty pro expozici oka s oslněním dokonce počítají: přirozený fyziologický reflex – zavření očí (mrknutí) a odvrácení hlavy – zkrátí při zásahu oka laserovým zářením expozici na dobu nepřekračující jednu čtvrtinu sekundy bez zavádění jakýchkoli opatření. I při expozicích značně nižších, než je nejvyšší přípustná, má však exponovaná osoba v důsledku oslnění ztížené a po nezanedbatelnou dobu často zcela znemožněné rozeznávání pozorovaného objektu zrakem. Jestliže právě řídí přistávání letadla nebo vykonává jinou činnost, jejíž úspěšnost závisí na vyhodnocování toho, co právě vidí, může mít oslnění katastrofální následky.

Tento článek se zabývá riziky spojenými s používáním laserů vyzařujících v kontinuálním režimu. Po stručném zhodnocení rizika trvalého poškození zraku se podrobněji zabývá rizikem způsobeným oslněním zářením laseru při expozici, která nejvyšší přípustnou hodnotu nepřekračuje. Ze zpráv přicházejících z letišť na celém světě, naše letiště nevyjímaje, je zřejmé, že k ohrožení osob oslněním laserovým zářením dochází nejčastěji při přistávání letadel – byly již dokumentovány tisíce pokusů zasáhnout laserovým svazkem letadlo nebo vrtulník. Provozovatelem laseru bývá v těchto případech téměř vždy laická osoba, kterou k pokusům trefit laserem letadlo nebo helikoptéru vede často jen zvědavost nebo hravost spojená s neznalostí než úmysl ohrozit zrak či činnost pilota. V článku posuzujeme riziko spojené s takovým počínáním a ilustrujeme je na červeném laserovém ukazovátku s výkonem výstupního svazku 1 mW a na zeleném laseru s výkonem výstupního svazku 50 mW. Oba tyto lasery září kontinuálně. Jsou běžně k dostání v internetových obchodech, cena laseru s výkonem 50 mW nepřekračuje 700 Kč i s dodávkou do domu. Příkon obstarávají u červeného laseru tři knoflíkové monočlánky, zelený laser napájí tři monočlánky typu AAA. Deklarované a změřené parametry obou laserů použité při výpočtech jsou uvedeny v Příloze.

Poškození sítnice

Závislost hustoty zářivého toku na vzdálenosti je pro oba posuzované lasery vyjádřena křivkami na Obr. 1. V grafu je vyznačena oblast s rizikem poškození zraku, oblast s překročením nejvyšší přípustné hodnoty (NPH) expozice a oblast, kde expozice způsobí jen oslnění.



Obr. 1 Závislost hustoty zářivého toku dvou posuzovaných laserů na vzdálenosti od apertury laseru. Plocha nad horní vodorovnou čárkovanou přímkou (označenou 125 W/m^2) patří expozicím, které mohou oko poškodit. Plocha pod dolní vodorovnou čárkovanou přímkou (označenou 25 W/m^2) je oblast oslnění. K oslnění dojde samozřejmě i při expozici kdekoli v oblasti nad vodorovnou přímkou označenou 25 W/m^2 , kde ovšem je již překročena nejvyšší přípustná hodnota expozice.

Poznámka: Nejvyšší přípustná hodnota je pro lasery uvažované v tomto textu definována nařízením vlády 1/2008 Sb., v platném znění, jako hustota zářivé energie o hodnotě $18 \cdot t^{0,75} \text{ J/m}^2$ dopadnuvší na rohovku oka (t je doba trvání expozice v sekundách). U laserů s nepřerušovaným vyzařováním, které dále posuzujeme, je expozice oka omezena na dobu nepřekračující 0,25 s, protože při prudkém oslnění, ke kterému při zasažení oka laserovým světlem dojde, se uplatní přirozený fyziologický reflex (zavření očního víčka, případně odvrácení hlavy) a expozice oka se tím přeruší. Místo hustoty zářivé energie je proto v tomto případě možné zjišťovat překročení nebo nepřekročení nejvyšší přípustné hodnoty podle hustoty zářivého toku dopadajícího na oko. Nejvyšší přípustné hodnotě expozice pak odpovídá hustota zářivého toku 25 W/m^2 . (Poznámka: blízko apertury laseru, kde je jeho světelný svazek užší než průměr zcela otevřené pupily oka, se hustota zářivého toku počítá pro hodnocení expozice oka jako podíl zářivého toku a plochy zcela otevřené oční pupily. Viz [6]).

Pokud jde o překročení NPH expozice a o případné trvalé poškození zraku, je z Obr. 1 zřejmé:

- Jestliže se osoba, jejíž oko je zasaženo světelným svazkem červeného laseru s výkonem 1 mW, násilím nebrání přirozenému fyziologickému reflexu, je trvalé poškození zraku (sítnice oka) zářením tohoto laseru nemožné.
- Pro zelený laser s výkonem 50 mW lze z grafu na Obr. 1 odečíst, že expozice oka ze vzdálenosti 97 m trvající 0,25 s je právě rovná nejvyšší přípustné hodnotě. Ta je stanovena pro všechny expoziční situace nejméně pětkrát níž, než je hranice možného trvalého poškození sítnice, takže teprve zásah oka ze vzdálenosti rovné 43 metrům nebo kratší znamená (při době expozice 0,25 s) u zeleného laseru se zářivým tokem rovným 50 mW reálnou hrozbu poškození zraku.

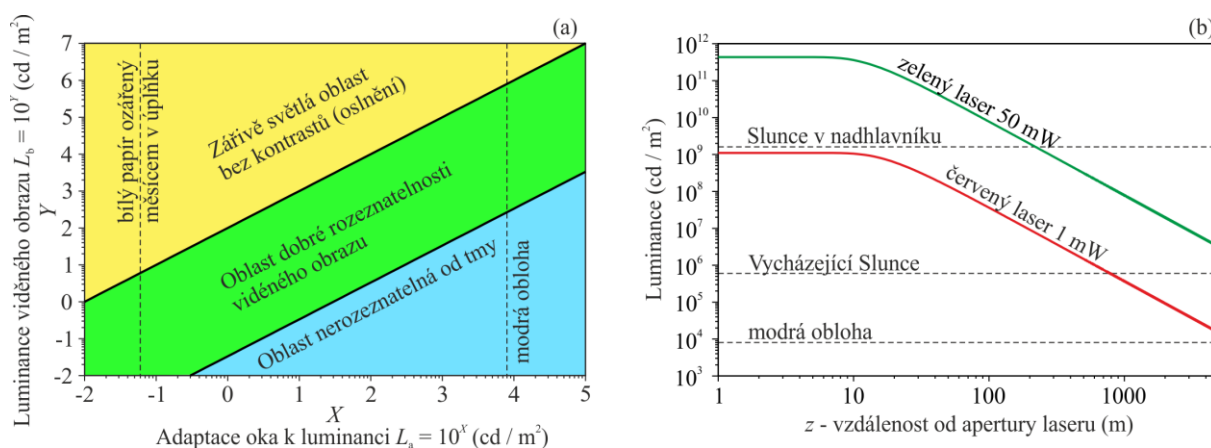
Není-li vzájemná poloha laseru a oka fixována, například drží-li osoba zářící laser v ruce, může být doba expozice při malých rychlých změnách směru svazku způsobených pohyby ruky značně kratší než čtvrtina sekundy. (Ve vzdálenosti 43 m od apertury zeleného laseru má svazek průměr 26 mm). Pupila oka má při dobrém osvětlení okolí průměr menší než 7 mm, z kterého vychází NPH. Je zřejmé, že k trvalému poškození zraku (sítnice oka) zásahem svazku ze vzdálenosti rovné 43 metrům v tomto případě sice dojít může, pravděpodobnost

takového poškození je však velmi malá. Při pohledu do svazku tohoto laseru ze vzdálenosti menší než 43 metrů je ovšem pravděpodobnost poškození zraku větší. Při pohlédnutí do svazku posuzovaného zeleného laseru z těsné blízkosti apertury se oko, kterým se dotýčná osoba do svazku podívala, poškodí s pravděpodobností blízkou jedné.

Oslnění

Oko člověka je s to vnímat světlo a vyhodnocovat pozorované obrazy v rozmezí intenzit čtrnácti řádů. Je-li adaptováno na úplnou tmou, je dolní hranice (práh) citlivosti oka pro světlo v okolí vlnové délky 500 nm. Oko je v tomto případě schopné indikovat světelný tok rovný přibližně $4 \cdot 10^{-12}$ lm [7]). Na druhém konci intervalu vidění je oko schopné rozeznávat rozdíly intenzity a barvy v pozorovaném obrazu ještě při luminanci rovné 10^6 cd/m². Přizpůsobení (adaptace) oka na určitou úroveň luminance probíhá při změně světelné situace poměrně pomalu – nejpomalejší je adaptace ze silného světla na úplnou tmou, kdy trvá přibližně půl hodiny. Zůstává-li vidění ve fotopické oblasti (10 cd/m² – 10^6 cd/m²), je doba adaptace zraku pro změněnou luminanci viděného obrazu krátká – od několika minut až po zlomky sekundy. Při přizpůsobení určité dané intenzitě světla je oko schopné rozeznat různost jasů (luminancí) ve viděném zorném poli přibližně v rozmezí hodnot 1:10000. Překračuje-li intenzita světla dopadajícího na oko více než stonásobně hodnotu, na kterou je oko právě adaptováno, přestává oko v nejsvětlejších místech viděného obrazu rozeznávat rozdíly v jasu a barvě. Při větších hodnotách luminance v obrazu pak dochází k nepříjemnému až nesnesitelnému pocitu oslnění. U oka adaptovaného na nízkou úroveň osvětlení je oslnění vnímáno intenzivněji (nepříjemněji), i když zdroj světla, který oslnění způsobil, je stejný. To je dobře známé i z běžné zkušenosti třeba při vycházení z tmavé místnosti do zasněžené krajiny ozářené sluncem. Stupeň oslnění závisí tedy nejen na intenzitě záření dopadajícího na oko a na jeho vlnové délce (barvě), ale také na stavu adaptace oka v okamžiku oslnění. Tato situace je schematicky znázorněna v grafu Obr. 2a.

Zásah oka laserovým svazkem je u posuzovaných situací náhlý a oko se nestačí dostatečně rychle adaptovat na vyšší intenzitu světla. Intenzita subjektivního vjemu oslnění závisí proto na aktuální adaptaci oka v okamžiku zásahu laserem, i když se vlivem této expozice adaptace později změní. Luminance dvou posuzovaných laserů je zobrazena na Obr. 2b. Porovnání s Obr. 2a ukazuje, že posuzované lasery mohou způsobit silné oslnění i ve vzdálenostech rovných stovkám až tisícům metrů.

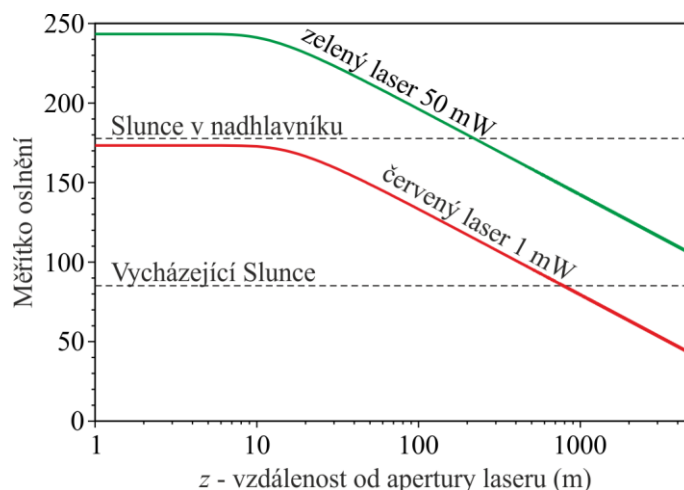


Obr. 2 (Panel a) Schematické znázornění dynamického rozsahu oka. Šikmý zelený pás vymezuje pro každý stav adaptace oka (X) příslušné hodnoty luminance (Y), které je oko s to odlišit od tmy a od prázdné zářivě světlé. Body ležící nad horním okrajem zeleného pásu odpovídají při dané adaptaci oka různému stupni oslnění. Čím výše se taková místa vyskytují, tím silnější je oslnění, které způsobují. V bezprostřední blízkosti vymezeného šikmého pásu je

oslnění slabé nebo vůbec nezatelné, oko však v ní již nerozezná případné kontrasty. (Panel b) Závislost luminance dvou posuzovaných laserů na vzdálenosti od apertury laseru a její srovnání s běžnými zdroji.

Měřítka oslnění

Kategorizace intenzity oslnění, které nutně je subjektivním vjemem, není zcela jednotná. Mezinárodní komise pro osvětlování (International Commission on Illumination) slovně oslnění charakterizuje čtyřmi stupni [8]. První (nejnižší) stupeň oslnění je rušivý (distracting), druhý nepříjemný (discomforting), třetí znemožňující rozeznat viděný obraz (disabling glare), čtvrtý oslepující (blinding glare). Existují však i jiná dělení a značení [9]. Pro vyhodnocení oslnění jsme v našem případě použili bezrozměrný parametr označený zkratkou GR (glare rating) definovaný vztahem [8] $GR = 24 + 27 \log(L_{\text{zdroj}}) - 24,3 \log(L_{\text{pozadí}})$, kde L_{zdroj} je luminance zdroje (cd/m^2) a $L_{\text{pozadí}}$ je luminance pozadí (cd/m^2). Jednotlivé stupně oslnění jsou charakterizovány těmito hodnotami: Nepozorovatelné (10), Pozorovatelné (30), Přijatelné (50), Rušivé (70), Neúnosné (90). Výsledek výpočtu parametru GR, které v různých vzdálenostech způsobí oku za jasného dne (při modré obloze, tj. při luminanci pozadí rovné 8000 cd/m^2) expozice záření posuzovaných dvou laserů je na Obr. 3. Hodnoty GR, které vyšly pro různé vzdálenosti, je v grafu možné porovnat s hodnotami GR Slunce v nadhlavníku (oslepující) a slunce těsně nad obzorem (oslnění jen rušivé, avšak dlouhodobě nesnesitelné). I posuzovaný červený laser (laserové ukazovátko) oslní. Z grafu lze odečíst, že ve vzdálenosti přibližně 790 m od apertury červeného laseru je oslnění stejné, jako od pohledu do slunce u obzoru. Ve vzdálenosti 100 metrů ($GR \approx 130$) expozice oka záření červeného laseru ztíží nebo krátce znemožní efektivní využití zraku k vyhodnocování viděného obrazu. Zelený laser způsobí oslnění ekvivalentní přímému pohledu do poledního slunce (a tedy zcela znemožňující vidění) ještě ve vzdálenosti přibližně 230 m od apertury ($GR \approx 180$). Ve vzdálenosti 5000 m je oslnění zeleným laserem ($GR \approx 110$) stále ještě větší než při pohledu do slunce na obzoru.



Obr. 3 Parametr GR (měřítka oslnění) pro dva posuzované lasery v závislosti na vzdálenosti od apertury laseru a její srovnání s běžnými zdroji. Pro pozadí byla použita luminance pozadí rovná 8000 cd/m^2 , což odpovídá denní modré obloze.

V experimentech, které jsme uskutečnili v exteriéru ve dne při zatažené obloze, znemožnilo oslnění červeným laserem rozeznávat obraz okolí ještě ve vzdálenosti 50 m. Při expozici ze vzdálenosti 10 m bylo navíc oslnění doprovázeno vizuálním vjemem barevných

skvrn v zorném poli trvajícím ještě několik minut po ukončení expozice. To je v souladu s výsledkem výpočtu parametru *GR*.

Při výpočtu i v experimentu jsme posuzovali oslnění, jehož zdroj je v centru zorného pole. Oslnění při zásahu oka (očí) laserovým svazkem z úhlu odlišného od úhlu pohledu je méně rušivé, je však i při nízkém stupni nebezpečné tím, že náhlé objevení se silného zdroje světla jinde, než je sledovaný objekt, může na krátkou dobu odvést pozornost od plnění úkolu řízeného zrakem a – v závislosti na činnosti osoby – způsobit materiální škodu, úraz nebo havárii. K odvedení pozornosti může dojít také v případě, kdy laserové světlo sice nezasáhne oči (oko) osoby, avšak ozáří nečekaně její okolí – například vnitřek kabiny letadla.

Při určování vzdáleností, v kterých dochází k různému stupni oslnění, jsme volili nejhorší možný případ, kdy v atmosféře nedochází k významnému zeslabení světelného svazku absorpcí nebo rozptylem, a neuvažovali jsme vliv prostorových a časových fluktuací indexu lomu neklidné atmosféry vedoucích ve větších vzdálenostech k narušení příčné homogenity svazku a k následnému časovému kolísání (blikání) světla dopadajícího při zásahu na oko. Všechny tyto jevy snižují stupeň oslnění zasažené osoby. Naproti tomu jsme pro luminanci pozadí vybrali poměrně vysokou hodnotu (denní modrou oblohu). Za šera nebo v noci přichází pro posouzení oslnění hodnota luminance, na kterou je oko adaptováno, i o několik řádů nižší.

Závěr

Je zřejmé, že riziko z expozice laserovému záření není jen v nebezpečí poškození zraku. I při expozicích daleko nižších než stanovená nejvyšší přípustná hodnota může oslnění světlem laseru způsobit vážnou havárii a následně poškodit zdraví nebo ohrozit či zmařit život (životy), jestliže laserový svazek zasáhne oči osoby, která zrakem právě vyhodnocuje rychle se měnící složitou situaci.

Vzdálenosti, na kterých může laser způsobit oslnění a ztížit nebo znemožnit oslněné osobě vidět pozorovaný objekt, jsou překvapivě velké i u laseru s nepříliš vysokým výkonem, jakým je zelený laser posuzovaný v tomto článku. Běžně dostupný zelený laser s desetkrát větším zářivým tokem (500 mW) způsobí stejné oslnění ve vzdálenostech zhruba trojnásobných než zelený laser se zářivým tokem 50 mW, kterým jsme se zabývali. Pro světelné efekty na diskotékách a jiných hromadných zábavných akcích se používají lasery s výkony rovnými desítkám wattů. Jak riziko z poškození zraku, tak i riziko vyvolané oslněním zářením laserů je tedy nemalé. Znemožnit dostupnost výkonných laserů nezletilým a nesvéprávným osobám a zavést registraci osob, které si výkonný laser opatřili, je patrně minimálním požadavkem, který ze současné situace vyplývá.

Zpracovali: Ing. Lukáš Jelínek, Ph.D., doc. RNDr. Luděk Pekárek, DrSc.
v listopadu 2013

Literatura

[1] D. Sliney and M. Wolbarsht, *Safety with Lasers and Other Optical Sources*, Plenum Publishing, New York, 1980.

[2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP):

(a) „Guidelines on limits of exposure to laser radiation“, *Health Physics* **71**, pp. 804-819, 1996.

(b) „Revision of Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 400 nm and 1.4 mm“, *Health Physics* **79**, pp. 431-440, 2000.

(c) „Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 μm“, *Health Physics* **105**, pp. 271-295, 2013.

[3] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), *A guide for control of laser hazards*, Cincinnati, 1990.

[4] American National Standards Institute (ANSI), *Safe use of lasers*, American National Standards Institute, New York; Standard Z-136.1, 1993.

[5] Directive 2006/25/EC of the European parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to risks arising from physical agents (artificial optical radiation) (19th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC), Official Journal of the European Union, L 114/38, 27.4.2006

[6] Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, Sbírka Zákonů, Částka 1, Strana 2-29, 2008.

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Absolute_threshold

[8] The International Commission on Illumination (CIE), *Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting applications*, CIE 112-1994.

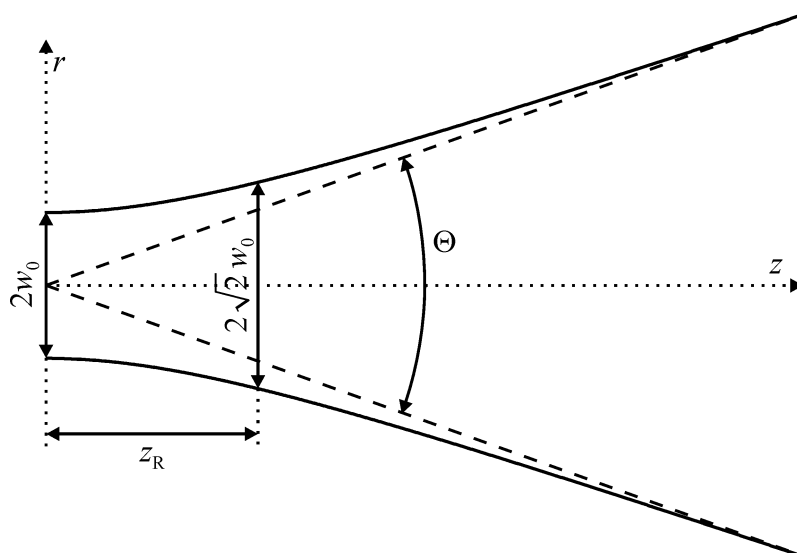
[9] J. Habel, K. Dvořáček, V. Dvořáček, P. Žák, *Světlo a osvětlování*, FCC PUBLIC, Praha, 2013.

Příloha - Model vyzařování laseru a experimentální určení jeho parametrů

Vyzařování laseru bylo modelováno Gaussovským svazkem (kvazioptické přiblížení). V tomto modelu je hustota zářivého toku S vyzařovaného laserem popsána jako (viz Obr. 4)

$$S(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-\frac{2r^2}{w^2(z)}}; \quad w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}; \quad z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (1)$$

kde P je výkon laseru, w_0 poloměr kruhové apertury laseru, $w(z)$ poloměr svazku ve vzdálenosti z od apertury laseru, r vzdálenost od osy svazku a λ vlnová délka vyzařovaného světla.



Obr. 4. Hranice Gaussovského svazku vyzařovaného laserem v závislosti na vzdálenosti. Souřadnice z je vzdálenost od roviny apertury laseru, souřadnice r je vzdálenost od osy svazku. Hranici svazku, na které je hustota zářivého toku rovná 13,5 % hustoty zářivého toku v ose svazku ukazují dvě plné křivky. Dvě čárkované přímky vycházející ze středu apertury laseru jsou asymptoty hranice svazku – rovinný úhel Θ je rozbíhavost svazku.

U posuzovaných laserů byl v návodu k použití uveden jen dosahovaný zářivý tok (ve wattch) a vlnová délka (v nanometrech). Divergence vyzařovaného světelného svazku, kterou je nutné znát pro zhodnocení účinků laserového svazku na oko, uvedena nebyla a bylo nutné ji určit

měřením profilu svazku v různých vzdálenostech od apertury. U červeného ukazovátka vyšla divergence svazku $\Theta = 0,00051$ rad (hodnota celého úhlu, v kterém dostatečně daleko od apertury laseru klesne hustota zářivého toku na hodnotu 13 % jeho maxima v ose svazku). Úhel divergence zeleného laseru vyšel rovný $\Theta = 0,00074$ rad. Měření ukázalo, že hustota zářivého toku v průřezu svazku odpovídala u obou laserů velmi dobře gaussovskému profilu.

Pro výpočty byly použity tyto parametry:

Laser 1 (červený, třída 2): $\lambda = 650$ nm, $P = 1$ mW, $w_0 = 0,77$ mm, $\Theta = 0,00051$ rad;

Laser 2 (zelený, třída 3B): $\lambda = 532$ nm, $P = 50$ mW, $w_0 = 0,46$ mm, $\Theta = 0,00074$ rad;

Symbolem w_0 je označena nejmenší hodnota poloměru svazku - u obou laserů byla v místě apertury.