

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum III



Úloha č. 28

Název úlohy: Helium-Neonový laser

Jméno: Vojtěch Votruba

Datum měření: 2024-04-12

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

Pracovní úkoly

1. Popište uspořádání HeNe laseru a vysvětlete princip stimulované emise.
2. Změřte, pod jakým úhlem jsou umístěna koncová okénka laserové trubice vzhledem k ose rezonátoru. Vysvětlete, proč byl zvolen tento úhel.
3. Sestavte funkční HeNe laser.
4. Změřte výkon laseru v závislosti na velikosti proudu procházejícího výbojovou trubicí (POZOR: MAXIMÁLNÍ hodnota proudu je 6,5 mA!).
5. Vysvětlete vliv vzdálenosti zrcadel hemisférického rezonátoru a vliv polohy výbojové trubice v rezonátoru na výkon laseru (případně ověřte měřením).
6. Proměřte některé parametry laserového svazku (např. profil svazku, vlnová délka, divergence, stupeň polarizace).

1 Teoretická část

1.1 Stimulovaná emise

Stimulovaná emise je kvantově mechanický jev hojně využívaný v moderní laserové technice. Jeho princip si nejlépe přiblížíme v porovnání s tzv. spontánní emisí.

O elektronovém obalu atomu víme, že je kvantován po jistých energetických vrstvách. Je-li pak elektronová konfigurace upravena tak, že je elektron přenesen ze své základní energetické hladiny na hladinu vyšší, hovoříme o tzv. excitovaném stavu. Spontánní emise je pak statistický jev, kdy se náhodně excitovaný elektron zřítí do energeticky nižší hladiny, při tomto propadu pak ztrácí energii, kterou vyzáří v podobě fotonu nesoucím dané energetické kvantum [1].

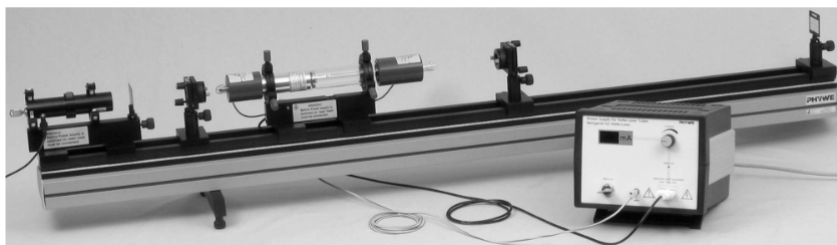
Takto tedy funguje spontánní emise, stimulovaná emise je rozdílná v tom, že deexcitace elektronu je vyvolána nikoliv „náhodou“, ale fotonem, kterým osvětlujeme daný atom [1]. Jelikož při stimulované emisi nedochází k absorpci onoho fotonu, skončíme po jejím průběhu se systémem, ve kterém nám deexcitoval jeden elektron a máme dva „volné“ fotony. Tyto fotony pak mohou dále deexcitovat další elektrony, čímž se bude lavinově uvolňovat čím dál více fotonů [1].

Aby k stimulované emisi mohlo docházet, musí být splněna tzv. populační inverze, což znamená, že vyšší stavy musí být obsazeny více než stavy nižší [1]. Důležité je také podotknout, že při stimulované emisi získává emitovaný foton stejnou frekvenci jako původní foton, který emisi zapříčinil. Tento fakt je klíčový pro stavbu laserů, což jsou typicky zdroje s velkou mírou koherence [1].

1.2 Helium-Neonový laser

1.2.1 Uspořádání

Jedním z laserů využívajících princip stimulované emise je právě Helium-Neonový laser. Jeho jednotlivé části a jejich uspořádání jsou k vidění na obr. 1.



Obrázek 1: Sestavený HeNe laser, [1]

Úplně vlevo na obrázku 1 vidíme naváděcí laser. Ten slouží jenom k tomu, abychom přesně nastavili ostatní optické prvky, konkrétně polohu dvou rezonátorových zrcadel a laserové trubice mezi nimi, jiný fyzikální význam v uspořádání nemá [1].

Dále vidíme dvě rezonanční zrcadla a laserovou trubicí mezi nimi. Levé použité zrcadlo je rovinné, zatímco pravé je zakřivené. Rezonátor slouží k tomu, aby do laserové trubice odrazil co nejvíce fotonů, které pak

mohou způsobovat co největší počet stimulovaných emisí [1]. Nejlepšího účinku rezonátoru dosahujeme, když je vzdálenost mezi oběma zrcadly přibližně polovina poloměru křivosti pravého zrcadla a když rovinné zrcadlo umísťujeme blízko levého konce laseru [1], to pak vede k tomu, že výbojovou trubicí prochází nejvíce fotonů a že máme tak nesilnější laser.

V samotné laserové trubici, která je naplněná směsí Helia a Neonu, pak dochází ke stimulované emisi a ke vzniku laserového svazku, trubice je na začátku a na konci ohraničená dvěma zrcadly, které jsou k ose rezonátoru umístěna přibližně pod Brewsterovým úhlem [1]. Brewsterův úhel je zvolen proto, že typicky chceme, aby světlo z laseru bylo nejenom koherentní, ale také polarizované a při odrazu pod Brewsterovým úhlem se odráží pouze na rovinu dopadu kolmo polarizované světlo.

1.2.2 Charakteristiky

Jedním z nejzákladnějších měření, co můžeme pro laser provést, je změření jeho výkonového profilu, což je jeden z parametrů, který máme podle pracovních úkolů měřit. Lasery typický mívají přibližně Gaussovo rozdělení. Změříme-li profil ve dvou vzdálenostech, můžeme z určitých parametrů vypočítat tzv. divergenci neboli rozptýlenost svazku D . Ta je definována jako

$$D = \frac{d_2 - d_1}{s}, \quad (1)$$

kde d_1, d_2 jsou průměry svazku ve dvou místech a s je vzdálenost mezi nimi [2].

Zkoumáme-li kvalitu polarizaci laseru, můžeme proměřit také jeho stupeň polarizace Λ , ten definujeme jako podíl

$$\Lambda = 1 - \frac{P_{min}}{P_{max}}, \quad (2)$$

kde P je výkon laseru pro průchodu polarizátorem při určitém natočení [3]. Ze vzorce (2) je vidět, že laser je nejlépe polarizován, když platí, že $\Lambda = 1$.

2 Výsledky a zpracování měření

2.1 Podmínky pokusu

Měření bylo provedeno v místnosti PIII v budově MFF UK na Karlově. Změřené podmínky termo-hygrobarometrem při pokusu byly následující: Teplota $t = 24,7(4)^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $\Phi = 35(3)\%$, tlak $p = 1002(2)$ hPa.

2.2 Sestavení laseru a měření výkonu

Velkou část měření zabralo samotné sestavování laseru. Všechny jeho polohovací šrouby jsou totiž velmi citlivé a získat tak průchozí paprsek bylo obtížné. Na podložce už byl předem umístěn naváděcí laser a výbojová trubice, šlo nám tedy hlavně o to sestavit rezonátor.

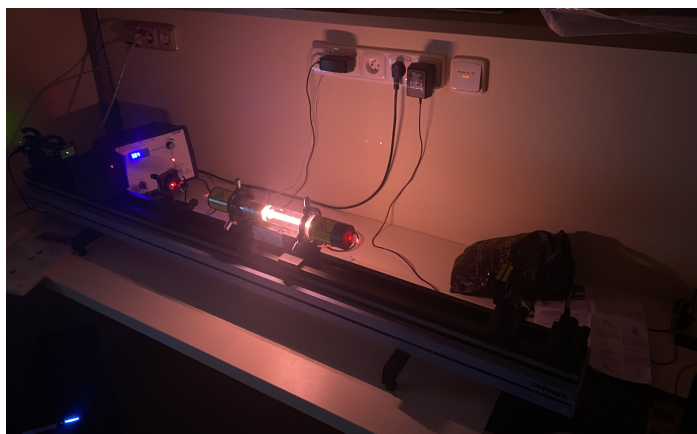
To se nám nakonec podařilo. Napravo jsme podle instrukcí umístili zakřivené zrcadlo a nalevo rovinné zrcadlo. Zrcadla měla vzájemnou vzdálenost 82,1(1) cm naměřenou pásmovým měřidlem (z toho plyne odhad chyby), pravé zrcadlo k výbojové trubici pak mělo 27,8(1) cm a levé zrcadlo 14,3(1) cm. Vzdálenost mezi zrcadly přibližně odpovídá v teorii zmíněným 50 % poloměru křivosti pravého zrcadla, ten byl podle papíru umístěném na polici v měřicí buňce $R = 1400$ cm. Funkční laser je k vidění na obr. 2

Jakmile se nám podařilo laser sestavit, proměřili jsme úhel odrazu od okrajových¹ skel výbojové trubice, naměřili jsme úhloměrem $\alpha = 60(2)^\circ$ a přesvědčili jsme se tak, že jde přibližně o Brewsterův úhel. Nejistota byla odhadnuta jako dva nejmenší dílky úhloměru.

Po fázi sestavování nás čekalo měření výkonu. Postupně jsme na zdroji měnili proud a měřič FIELDMASTER, na nějž byl laser zaměřený, nám ukazoval výkon. Před samotným měřením závislosti jsme ještě jemně otáčeli jednotlivými šroubky, abychom dosáhli maximálního výkonu pro fixní proud.

Nejistotu změřeného výkonu jsme odhadli z oscilací na měřiči jako $\sigma_P = 0,2 \mu\text{W}$, pro nejistotu proudu jsme provedli horní odhad a vzali jsme jednotku v posledním řádu, co nám přístroj ukazoval, $\sigma_I = 0,01$ mA. Takto naměřená data jsou uvedena v tabulce 1 a graficky jsou zpracována do obr. 3.

¹také nazývaných Brewsterovými skly [1]



Obrázek 2: Sestavený Helium-Neonový laser

Tabulka 1: Naměřené hodnoty výkonu laseru v závislosti na proudu

I / mA	$P / \mu\text{W}$
6,47(1)	20,9(2)
6,17(1)	20,3(2)
5,94(1)	20,0(2)
5,64(1)	19,6(2)
5,45(1)	19,1(2)
5,23(1)	18,8(2)
5,06(1)	18,3(2)
4,88(1)	17,9(2)
4,61(1)	17,2(2)
4,40(1)	16,7(2)
4,25(1)	16,3(2)

2.3 Profil svazku, divergence a stupeň polarizace

V rámci posledního pracovního úkolu máme proměřit některé charakteristiky laseru. Nejprve se zaměříme na profil svazku. Ten jsme proměřili pomocí profilometru spojeného s počítačem se softwarem od **ThorLabs**, který nám profil zobrazil a gaussovsky nafitoval. Výsledky fitu i profil je k vidění na obr. 4 a jeho 3D vizualizace je k vidění na obr. 5.

Porovnáme-li nyní již proměřený profil svazku s jiným profilem proměřeným ve větší vzdálenosti, můžeme vypočítat divergenci. Abychom laser přenesli přes větší vzdálenost, sestavili jsme s pomocí vyučujících v praktiku soustavu ze zrcadel, jejíž fotografie je na obr. 6. Vzdálenost s jsme proměřili pásmovým měřidlem, a protože geometrie soustavy nedovolovala měřit přímo, odhadli jsme nejistotu jako $\sigma_s = 5 \text{ cm}$, celková naměřená vzdálenost pak byla $s = 170(5) \text{ cm}$.

Profil naměřený v této vzdálenosti od původního profilu je na obr. 7, zvolíme-li si například parametr **Gaussian Diameter** x vyjde nám divergence jako

$$D = 1,64(5) \times 10^{-3}, \quad (3)$$

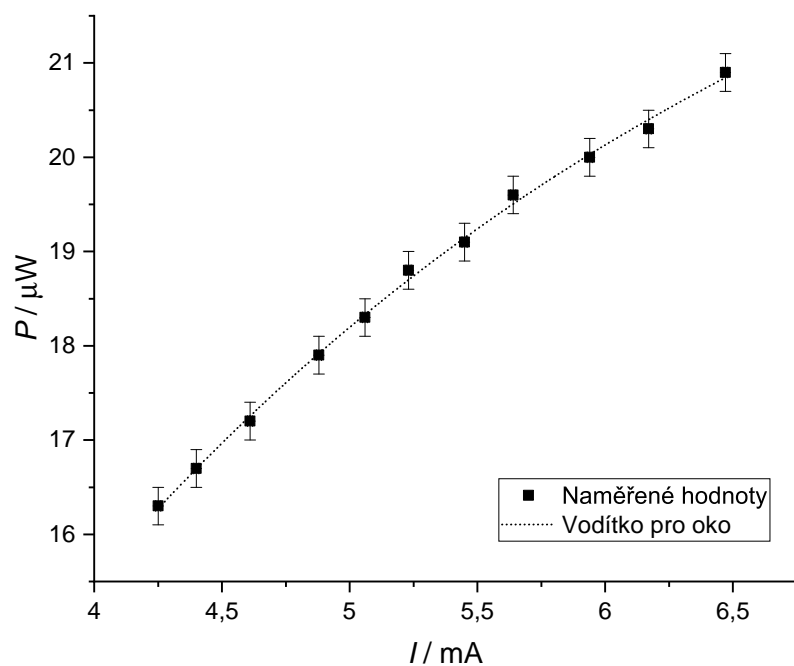
kde jsme její nejistotu spočetli pouze z nejistoty σ_s , neboť nejistota gaussovského průměru bude vůči ní zanedbatelná, konkrétně jsme použili vzorec

$$\frac{\sigma_D}{D} = \frac{\sigma_s}{s}. \quad (4)$$

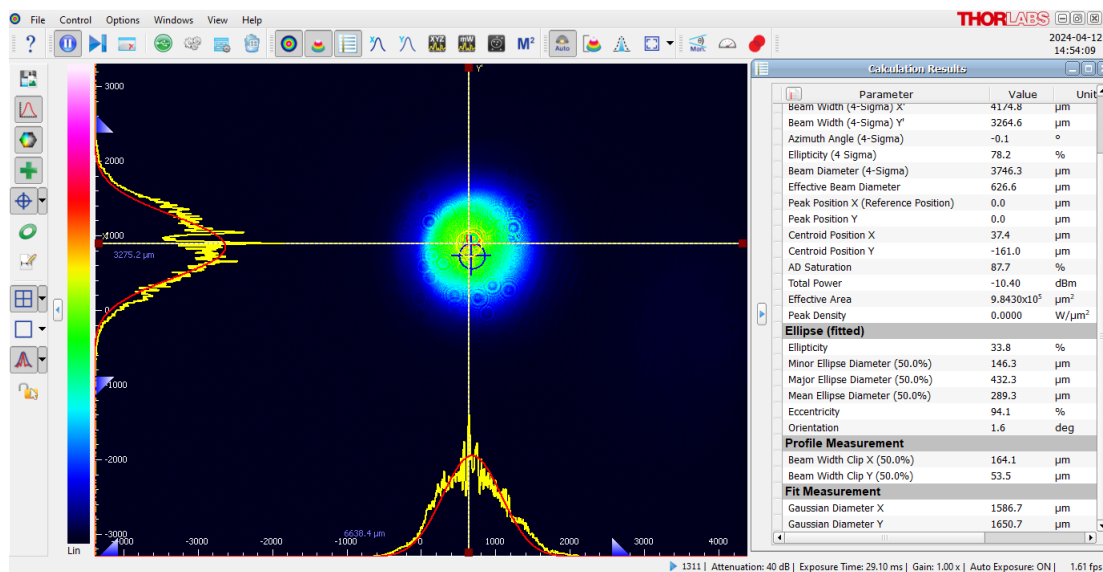
Poslední parametr, který jsme se rozhodli proměřit, byl stupeň polarizace Λ . To jsme provedli tak, že jsme měřili výkon pomocí již zmíněného měřiče **FIELDMASTER**, před něj jsme umístili otočný polarizátor. Tento polarizátor jsme postupně otáčeli a proměřovali výkon pro různé úhly. Nejistoty obou měřených veličin jsme již uváděli výše, pro úhel jsme odhadli $\sigma_\varphi = 2^\circ$ a pro výkon $\sigma_P = 0,2 \mu\text{W}$. Naměřená data jsou v tabulce 2, leč z těchto dat využijeme pouze nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotu výkonu.

Použijeme-li pro výpočet vzorec (2), získáváme

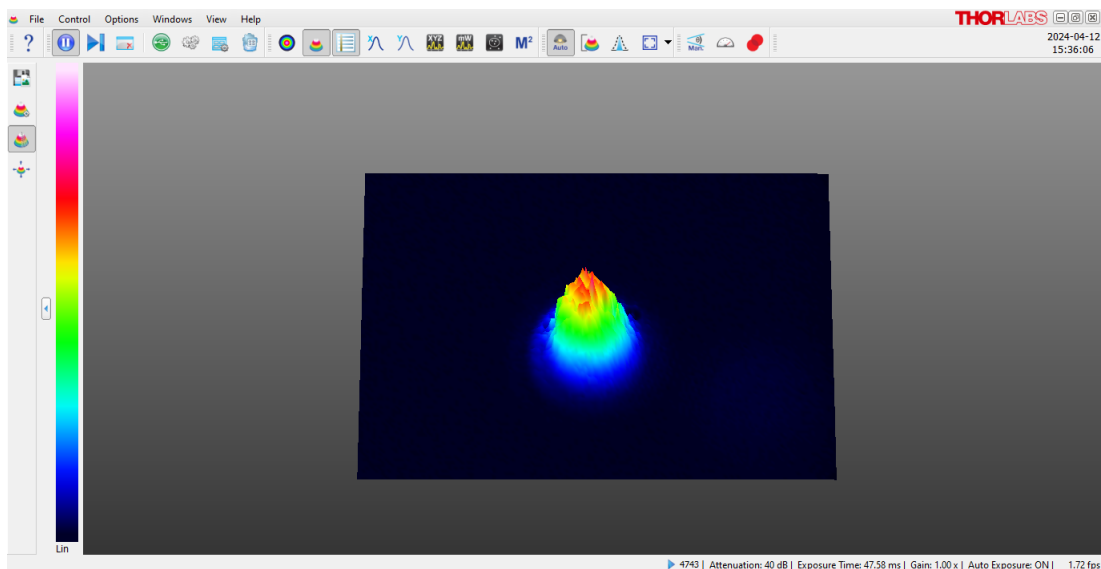
$$\Lambda = 1,00(1), \quad (5)$$



Obrázek 3: Závislost výkonu laseru P na proudu I



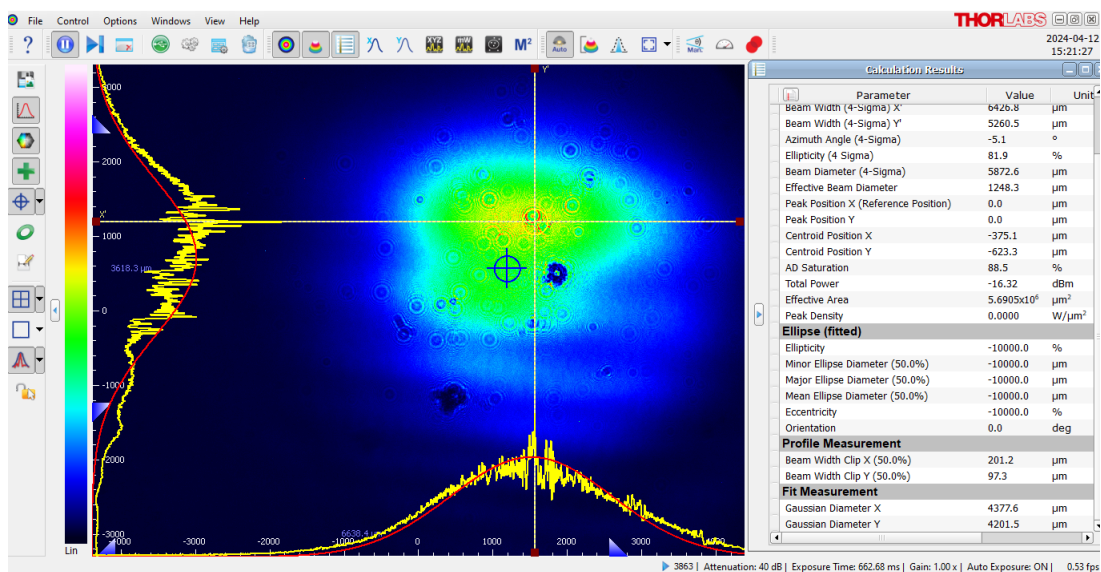
Obrázek 4: Naměřený profil laseru, jeho gaussovský fit a parametry fitu



Obrázek 5: Naměřený profil laseru, vizualizovaný ve 3D



Obrázek 6: Soustava několika zrcátek použitá pro proměření divergence svazku



Obrázek 7: Naměřený profil laseru s příslušnými informacemi ve vzdálenosti s od původního profilu

Tabulka 2: Naměřené hodnoty výkonu P pro různé úhly φ na stupnici polarizátoru

$\varphi / ^\circ$	$P / \mu\text{W}$
0(2)	8,5(2)
15(2)	12,4(2)
30(2)	15,1(2)
45(2)	16,4(2)
60(2)	14,8(2)
75(2)	11,3(2)
90(2)	7,7(2)
105(2)	3,6(2)
120(2)	0,9(2)
135(2)	0,0(2)
150(2)	1,3(2)
165(2)	4,3(2)
180(2)	8,4(2)

kde jsme nejistotu spočetli podle zákona přenosu chyb jako

$$\sigma_\Lambda^2 = \frac{1}{P_{max}^2} \sigma_P^2 + \left(\frac{P_{min}}{P_{max}} \right)^2 \sigma_P^2. \quad (6)$$

3 Diskuse výsledků

3.1 Sestavení laseru a měření výkonu

Jak jsme již zmínili v předchozí sekci, sestavování bylo náročné kvůli velké citlivosti celé aparatury. Nakonec se nám to ale podařilo a získali jsme stabilní laser. Diskuzi sestavování je těžké provádět jakkoliv kvantitativně, a proto se přesuneme k měření výkonu.

Podle očekávání pozorujeme, že s rostoucím proudem, roste i výkon laseru. Zároveň ale pozorujeme jisté nasycení, kdy se derivace výkonu podle proudu zmenšuje. Vodítko pro oko, které jsme použili na obr. 3, bylo nabitý exponenciální pokles a vidíme, že poměrně přesně odpovídá dané závislosti.

3.2 Profil svazku, divergence a stupeň polarizace

Naměřený profil svazku můžeme vidět na obr. 4, 5 a 7. Ze všech těchto grafů vidíme, že fit dobře odpovídá gaussovskému rozdělení. Pomocí tohoto fitu jsme dále určovali divergenci svazku. Divergence byla naměřena s uspokojivou nejistotou a odpovídá technické specifikaci od výrobce [1], tj. že $d < 2 \times 10^{-3}$.

Dále jsme proměřovali polarizaci. Nejprve si můžeme všimnout, že hodnota $\phi = 0^\circ$ a $\varphi = 180^\circ$, což nás příliš nepřekvapí. Stupeň polarizace pak vyšel jako $\Lambda = 1,00(1)$, to je hodnota odpovídající perfektně polarizovanému laseru. Kvůli různým nedokonalostem v konstrukci je ale jasné, že laser ve skutečnosti dokonale polarizovaný nebude, tuto hodnotu jsme získali jen kvůli naší relativně vysoké chybě měření výkonu, kvůli které nám jedná z hodnot vyšla jako $P = 0,0 \mu\text{W}$.

V každém případě je ale laser velmi dobře polarizován, což zajišťují již v teorii zmíněná Brewsterova sklíčka.

Celkově vidíme, že všechny parametry odpovídají teoretickým předpokladům, a měření tak můžeme prohlásit za úspěšné. Abychom proměřili i jiné parametry například vlnovou délku laseru, museli bychom zvolit komplikovanější postup s nějakým přístrojem například se spektrometrem.

4 Závěr

Podařilo se nám sestavit funkční Helium-Neonový laser, vysvětlit jeho princip a změřit některého jeho charakteristiky. Proměřili jsme primárně jeho profil, ale také jsme naměřili jeho divergenci, která vyšla jako

$$D = 1,64(5) \times 10^{-3} \quad (7)$$

Dále jsme také proměřili závislost výkonu laseru na proudu a grafické zpracování této závislosti jsme vložili do protokolu. Nakonec jsme také měřili stupeň polarizace, u nějž jsme ověřili, že má hodnotu $\Lambda = 1,00(1)$.

Reference

- [1] *Helium-Neonový laser* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/328>
- [2] *Stavba Michelsonova interferometru a ověření jeho funkce* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/320>
- [3] *The Polarization of Light* [online]. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <http://www.physics.umd.edu/courses/Phys375/AnlageFall105/lab3.pdf>