

Výbojkově čerpaný neodýmový laser se zesilovačem

Magdalena Benešová¹, Adam Seidl², Ján Glut³, Michal Němec⁴

¹VOŠ a SPŠE Plzeň, *benesovam@spseplzen.cz*

²Nový PORG Praha, *seidladam@novyporg.cz*

³EGJT Liptovský Mikuláš, *jano.glut@gmail.com*

⁴Gymnázium Vídeňská Brno, *michaelnemec47@gmail.com*

Abstrakt

V rámci experimentální úlohy byly proměřovány časové a energetické charakteristiky výbojkově čerpaného Nd:YAG laseru v režimech volné generace a Q-spínání. Dále byla zkoumána závislost zesílení laserového pulsu Nd:YAG zesilovače na energii buzení a v závěru byla pomocí nelineárního optického krystalu KDP transformována energie záření základní harmonické frekvence (1064 nm) do okem viditelné oblasti 2. harmonické frekvence (532 nm).

1 Úvod

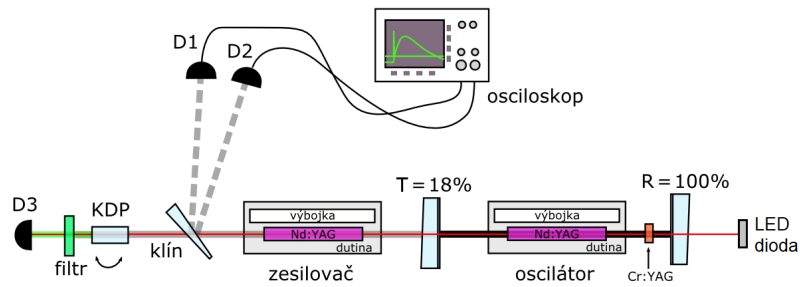
Krystal Nd:YAG je tvořen aktivními ionty neodymu, které poskytují možnost zesilování optického záření v matici yttrito-hlinitého-granátu YAG ($Y_3Al_5O_{12}$). Nd:YAG laser byl poprvé na světě zprovozněn v roce 1964 skupinou J. E. Geusica v Bellových laboratořích ve Spojených státech amerických. Dodnes bylo s tímto aktivním prostředím dosaženo velké množství možných operací od kontinuálního režimu až po režim generace velmi krátkých impulsů. Laser generuje záření v blízké infračervené části elektromagnetického spektra a jeho využití je velice široké od průmyslu: laserové vrtání, řezání, svařování, žíhání, značkování; přes medicínu: odstranění šedého zákalu, redukce nitroočního tlaku až po vojenské účely. V současné době se jedná o nejpoužívanější laser na světě. [1], [2]

2 Naměřené výsledky

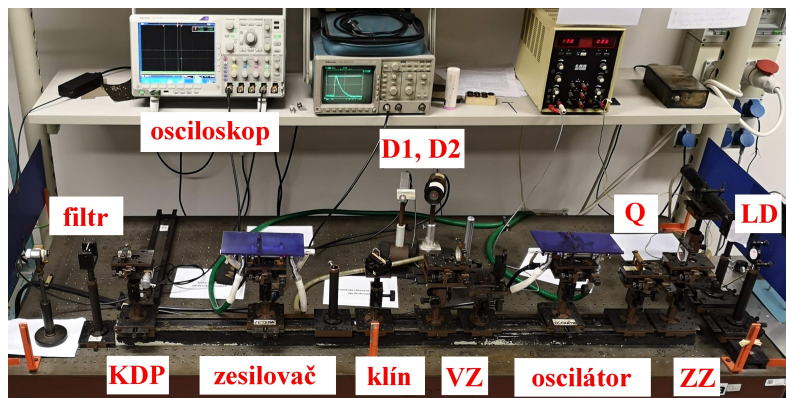
2.1 Parametry laserového rezonátoru a použité měřicí přístroje

Optický rezonátor byl tvořen dvojicí rovinných zrcadel. Zadní zrcadlo mělo odrazivost $R_1 \simeq 100\% @ 1064\text{ nm}$ a výstupní zrcadlo $R_2 = 82\% @ 1064\text{ nm}$. Délka sestaveného rezonátoru byla $L = 53\text{ cm}$.

Na obrázku 1 je nakreslené zjednodušené schéma experimentálního uspořádání a na obrázku 2 následuje fotografie sestaveného laserového systému.



Obrázek 1: Zjednodušené schéma experimentální sestavy. D1–D3 – detektory pro měření energie a délky pulsu. [2]



Obrázek 2: Fotografie uspořádání Nd:YAG laserového systému se zesilovačem a popisem jednotlivých součástí. D1 – fotodioda snímající časový průběh záření, D2 – pyroelektrický měřič energie s citlivostí $S = 15,8 \text{ V/J}$, LD – trasovací laserová dioda, VZ – výstupní zrcadlo, ZZ – zadní zrcadlo, Q – saturovatelný absorbér Cr:YAG pro pasivní Q-spínání, KDP – krystal pro generaci druhé harmonické frekvence.

2.2 Měření výstupních charakteristik Nd:YAG laserového záření

Optické buzení laseru zajišťovala xenonová výbojka napájená externím vysokonapětovým zdrojem skládajícím se z kondenzátoru o kapacitě $C = 100 \mu\text{F}$ a cívky. Energie budícího záření za předpokladu ideální transformace elektrické energie na optickou energii výboje E_b byla z dané kapacity kondenzátoru C a napětí zdroje U_b vypočítána podle vztahu

$$E_b = \frac{1}{2} C U_b^2. \quad (1)$$

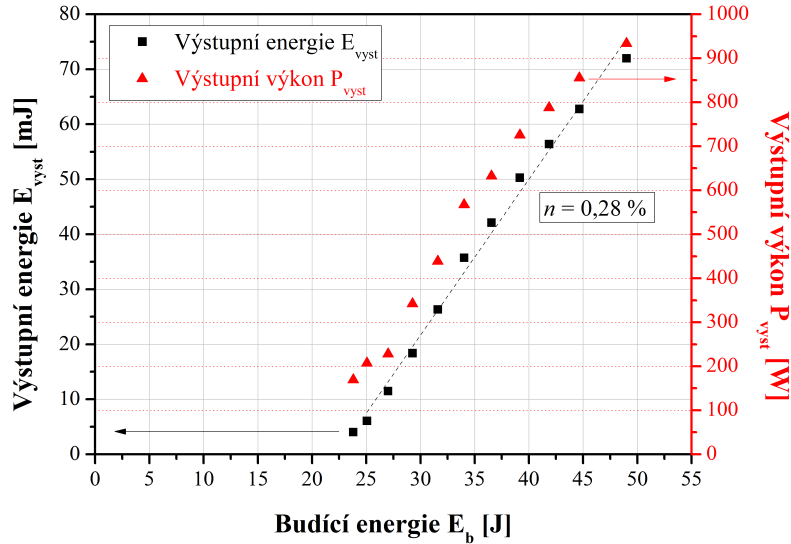
Energie a délka pulsu byla detekována nepřímo za odrazem optického klínu s odrazivostí $R = 4\%$ umístěného v ose generovaného laserového svazku. Na energetické sondě s citlivostí $S = 15,8 \text{ V/J}$ byla přidělena ještě matnice s transmittancí $T = 62\%$. Z tohoto důvodu byla výstupní energie Nd:YAG laseru E_{vyst} přepočítána z naměřeného napětí na osciloskopu U_{vyst} podle vztahu

$$E_{\text{vyst}} = \frac{U_{\text{vyst}}}{S \cdot T \cdot R}. \quad (2)$$

Střední výstupní výkon P_{vyst} byl vypočítán z podílu výstupní energie pulsu E_{vyst} a jeho celkové délky t_p

$$P_{\text{vyst}} = \frac{E_{\text{vyst}}}{t_p}. \quad (3)$$

Graf naměřené závislosti výstupní energie E_{vyst} a výstupního výkonu P_{vyst} na energii budícího záření výbojky E_b je uveden na obrázku 3.

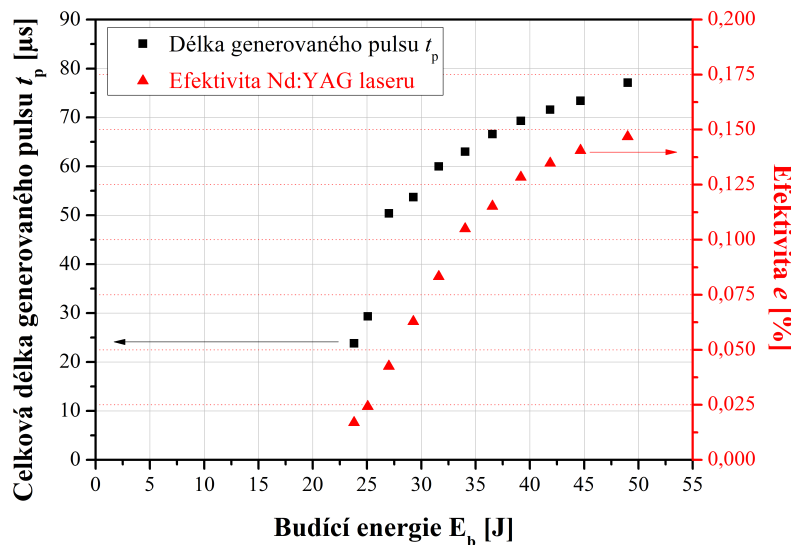


Obrázek 3: Graf závislosti výstupní energie (černě) a výstupního výkonu (červeně) na energii budícího záření výbojky. n – diferenciální účinnost.

Z naměřené závislosti výstupní energie E_{vyst} na energii buzení E_b byla následně vypočítána na efektivita Nd:YAG laseru n

$$n = \frac{E_{\text{vyst}}}{E_b}. \quad (4)$$

Výsledný graf závislosti efektivity a délky generovaného pulsu na budící energii je uveden na obrázku 4.



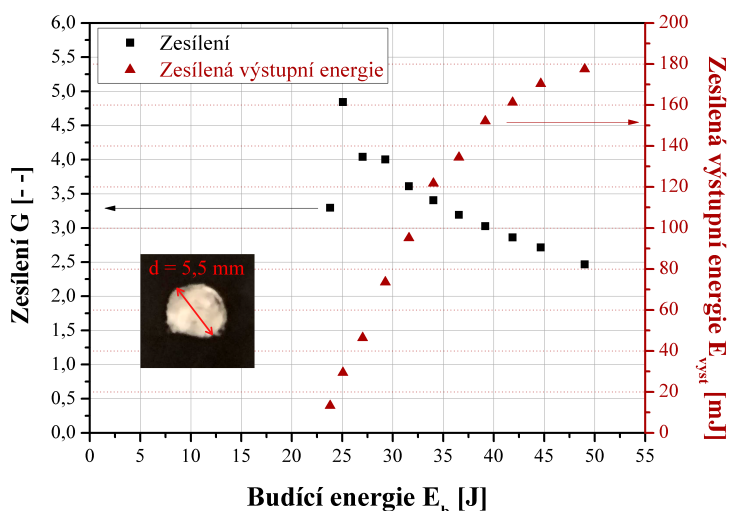
Obrázek 4: Graf závislosti celkové délky generovaného pulsu t_p v režimu volné generace (černě) a efektivit e Nd:YAG laseru (červeně) na energii budícího záření E_b .

2.3 Zesilování laserového záření Nd:YAG zesilovačem

Zesílení G jednorůchodového laserového zesilovače bylo vypočítáno z naměřených hodnot energie na vstupu E_{vst} a na výstupu E_{vyst} zesilovače podle vztahu

$$G = \frac{E_{vyst}}{E_{vst}}. \quad (5)$$

Graf závislosti zesílení laserového zesilovače a výstupní energie po zesílení na energii buzení je zobrazen na obrázku 5.



Obrázek 5: Graf závislosti zesílení jednorůchodového Nd:YAG laserového zesilovače G (černě) a výstupní energie zesíleného záření (červeně) na energii buzení. Na fotografii vlevo je pro ilustraci zaznamenána stopa svazku s vyznačeným průměrem d .

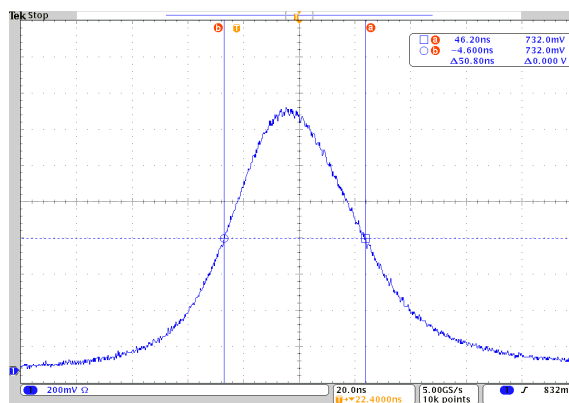
Pro výstupní výkon $P_{vyst} = 2,3 \text{ kW}$ byla na fotocitlivý papír zaznamenána téměř kruhová stopa generovaného laserového svazku s průměrem $d = 5,5 \text{ mm}$. Tomuto průměru odpovídá plocha svazku o velikosti $A = 0,237 \text{ cm}^2$. Následně byla vypočítána plošná hustota výkonu laserového záření W podle vztahu

$$W = \frac{P_{vyst}}{A}. \quad (6)$$

Vypočítaná hustota záření vychází $W = 9,7 \text{ kW/cm}^2$.

2.4 Charakterizace krátkých Q-spínaných pulsů

Pro generaci krátkých pulsů byl do rezonátoru vložen krystal saturovatelného absorbéru Cr:YAG, který díky své nelineární absorpci umožnil provozovat laser v režimu pasivního Q-spínání. Na obrázku 6 je zaznamenán časový průběh jednoho Q-spínaného pulsu. Délka a energie tohoto impulsu byla z důvodu odchylek těchto parametrů mezi jednotlivými pulsy měřena statisticky z průměru deseti měření. Průměrná energie Q-spínaného pulsu s odpovídající střední kvadratickou odchylkou byla $E_Q = (26,2 \pm 2,6) \text{ mJ}$ s průměrnou délkou pulsu $\tau_Q = (48,8 \pm 2,4) \text{ ns}$. Tomu odpovídá špičkový výkon $P_{peak} = (539 \pm 64) \text{ kW}$.



Obrázek 6: Oscilogram Q-spínaného pulsu.

3 Diskuze a závěr

V rámci experimentální úlohy byly proměřovány základní charakteristiky laserového záření výbojkově čerpaného Nd:YAG laseru. Maximální dosažená výstupní energie ve volně běžícím režimu byla $E_{\max} = 72 \text{ mJ}$ a délkou pulsu $t_p = 77,1 \mu\text{s}$. Tomu odpovídal střední výstupní výkon $P_{\max} = 933,4 \text{ W}$. Diferenciální účinnost laserového systému byla $\eta = 0,28 \%$. Vyšší účinnosti laserového systému by bylo možné dosáhnout například při použití čerpání aktivního prostředí Nd:YAG laserovou diodou.

V další části bylo proměřováno zesílení G jednorůchodového laserového zesilovače. Z naměřené závislosti zesílení na budící energii vychází, že k největšímu zesílení $G_{\max} = 4,84$ dochází při budící energii $E_b = 25 \text{ J}$. Maximální zesílená energie výstupního záření zesilovače byla $E_{z\max} = 177,5 \text{ mJ}$. Pro tuto energii byla také zaznamenána plocha generovaného svazku, které odpovídala hustota laserového záření $W = 9,7 \text{ kW/cm}^2$.

Následně byl do rezonátoru přidán krystal Cr:YAG zajišťující pasivní Q-spínání s generací krátkých pulsů o délce $\tau_Q = (48,8 \pm 2,4) \text{ ns}$ a energii $E_Q = (26,2 \pm 2,6) \text{ mJ}$, čemuž odpovídal špičkový výkon $P_{\text{peak}} = (539 \pm 64) \text{ kW}$.

Na závěr byly Q-spínané pulsy nasměrovány do nelineárního krystalu KDP (KH_2PO_4), ve kterém docházelo ke konverzi blízkého infračerveného záření Nd:YAG laseru o vlnové délce $\lambda = 1064 \text{ nm}$ do viditelné části spektra o dvojnásobné frekvenci záření (tj. poloviční vlnové délce $\lambda = 532 \text{ nm}$). Záření v zelené části viditelného spektra jsme pozorovali na stínítku za infračerveným filtrem nepropouštějícím záření o vlnové délce $\lambda \geq 1 \mu\text{m}$.

Poděkování

Tímto bychom chtěli poděkovat všem organizátorům TV@J za možnost tvorby vlastního článku a za prostředky pro jeho vytvoření.

Literatura

- [1] M. Vrbová, *Oborová encyklopedie Lasery a moderní optika*, Prometheus, ISBN 80-8549-56-9, 1994.
- [2] A. Říha, *Návod k miniprojektu č. 43*, online: http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/fyztyd/evergreen/MPs/19/MP_Neodymovy_laser.pdf, 2019.