

Výbojkově čerpaný neodýmový laser se zesilovačem

K. Bednář¹, D. Káčerek², M. L. Skuda³, J. Kaška⁴

¹Střední průmyslová škola Třebíč, *bednark.05@spst.eu*

²Mikulášské gymnázium Plzeň, *kacerekdan@gmail.com*

³Gymnázium Boskovice, *skuda.maxmilian@email.cz*

⁴Gymnázium Žamberk, *kaska.gyzamb@gmail.com*

Abstrakt:

Cílem práce bylo proměřit a zjistit vlastnosti pevnolátkového Nd:YAG laseru se zesilovačem při volné generaci i režimu Q-spínání. Článek popisuje závislost relativního zesílení na vstupující energii i podmínky, za nichž byl dosažen špičkový výkon 534 kW.

1 Úvod

LASER je kvantové zařízení, které dokáže pomocí jevu zesílené spontánní emise generovat záření s unikátními vlastnostmi: koherence (vnitřně uspořádané, sfázované), monochromaticnost (všechny fotony mají stejnou vlnovou délku, resp. frekvenci, resp. energii), nízká rozbíhavost svazku (fotony laserového záření se pohybují stejným směrem) a vysoká hustota výkonu záření. Laser se skládá ze tří základních částí: aktivní prostředí, buzení/chlazení a optický rezonátor. V našem případě se jednalo o aktivní prostředí tvořené krystalem Nd:YAG (yttrito-hlinitý-granát – $Y_3Al_5O_{12}$). Nd:YAG laser byl poprvé na světě zprovozněn v roce 1964 skupinou J. E. Geusica v Bellových laboratořích v USA [1].

2 Naměřené výsledky

2.1 Použité měřicí přístroje a parametry laserového rezonátoru

Délka sestaveného optického rezonátoru byla $l = 53$ cm. Nd:YAG krystal měl délku $l_{AP} = 10$ cm. Optický rezonátor se skládal z dvojice rovinných zrcadel. Během měření jsme použili trojici výstupních zrcadel Z1-Z3 s odrazivostmi $R_1 = 7\%$, $R_2 = 48\%$, a $R_3 = 86\%$ na vlnové délce 1064 nm. Druhé zrcadlo rezonátoru mělo odrazivost $R = 100\%$ na vlnové délce 1064 nm. Pro měření energie laserového záření jsme použili pyroelektrický detektor s citlivostí $C = 15,8$ V/J. Výstupní laserové záření bylo odraženo na detektory optickým klínem s odrazivostí $R_k = 4\%$. Na energetickém detektoru byla umístěna matnice s transmitancí $T_m = 62\%$. Výstupní energie $E_{výst}$ byla přepočtena z napětí změřeného na osciloskopu dle následujícího vztahu:

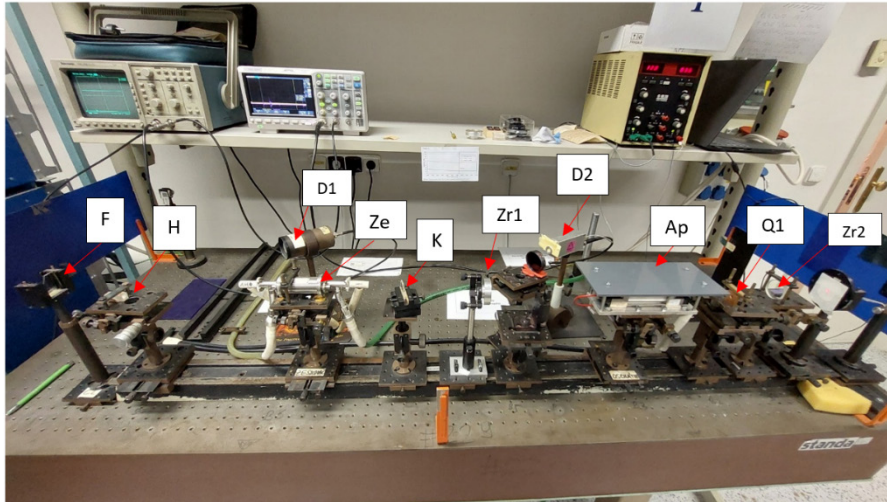
$$E_{výst} = \frac{U_{výst}}{CT_m R_k}. \quad (1)$$

Délku pulzu t_p jsme měřili pomocí křemíkové fotodiody. Výstupní výkon $P_{výst}$ jsme přepočítali z naměřené energie $E_{výst}$ podle vztahu:

$$P_{výst} = \frac{E_{výst}}{t_p}. \quad (2)$$

Oba detektory byly připojeny k osciloskopu, ze kterého byly odečítány naměřené hodnoty. Nd:YAG krystal byl čerpaný xenonovou výbojkou, jež byla napájena z laboratorního zdroje s kondenzátorem o kapacitě $C=100 \mu\text{F}$. Kondenzátor s regulovatelným napětím U se vybíjel přes cívku do výbojky. Pro výpočty jsme uvažovali, že veškerá elektrická energie nabitého kondenzátoru se přemění na energii optickou. Budící energie E_b byla vypočtena podle následujícího vztahu:

$$E_b = \frac{1}{2}CU^2. \quad (3)$$



Obrázek 1 Fotografie experimentálního uspořádání sestaveného Nd:YAG laserového systému.

Pro naše měření jsme použili aparaturu viz Obr. 1, kde **F** je filtr IČ záření, **H** nelineární krystal KDP, **D1** energetický detektor, **Ze** Nd:YAG jednorůchodný výbojkově buzený zesilovač, **K** optický klín, **Zr1** částečně propustné zrcadlo rezonátoru, **D2** senzor časového průběhu záření, **Ap** aktivní prostředí laseru, **Q1** saturovatelný absorbér, **Zr2** totálně odrazné zrcadlo rezonátoru.

2.2 Výstupní charakteristiky Nd:YAG laserového systému

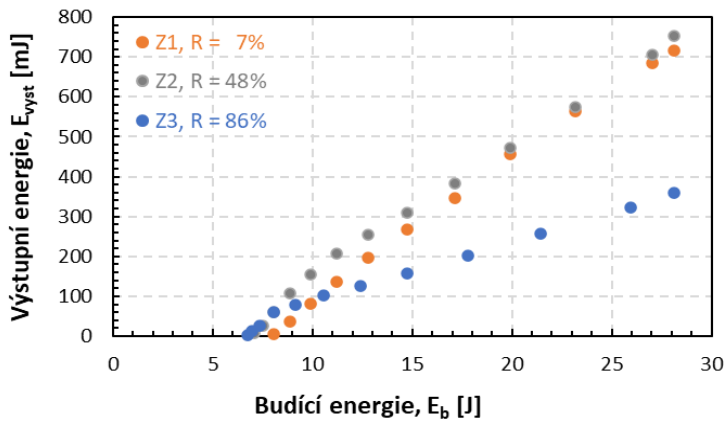
Naměřená závislost výstupní energie na budící energii výbojky pro tři různá výstupní zrcadla rezonátoru Z1-Z3 je uvedena na Obr. 2. Účinnost laserového systému byla vypočítána jako podíl výstupní energie $E_{výst}$ a budící energie E_b

$$\eta = \frac{E_{výst}}{E_b}. \quad (4)$$

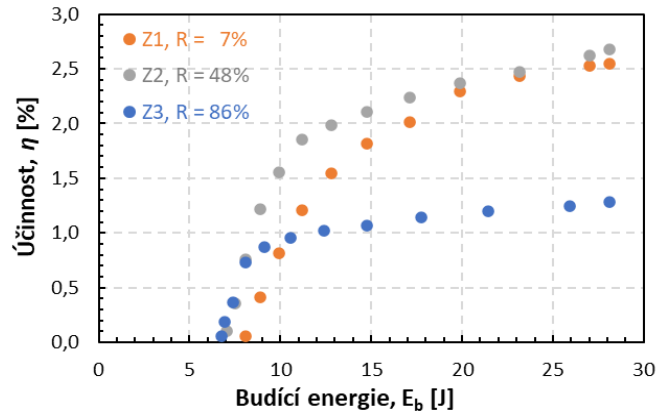
Závislost účinnosti na budící energii je uvedena na Obr. 3. Závislost výstupního výkonu vypočítaného podle vztahu (2) a délky pulzu na budící energii je graficky znázorněna na Obr. 4. Maximální budící energii 28,1 J odpovídala velikost kruhového svazku o průměru $d = 4 \text{ mm}$ (což odpovídá ploše $S = 0,1257 \text{ cm}^2$). Z toho jsme určili plošnou hustotu výkonu generovaného záření W

$$W = \frac{P_{výst}}{S} \quad (5)$$

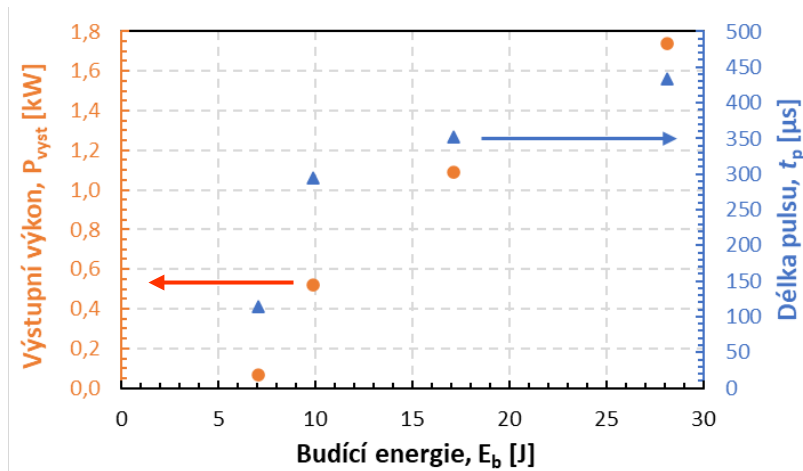
Maximální plošná hustota výkonu laserového záření při $P_{výst} = 1,74 \text{ kW}$ vychází $13,84 \text{ kW/cm}^2$.



Obrázek 2 Závislost výstupní energie na budící energii.



Obrázek 3 Závislost účinnosti na budící energii.

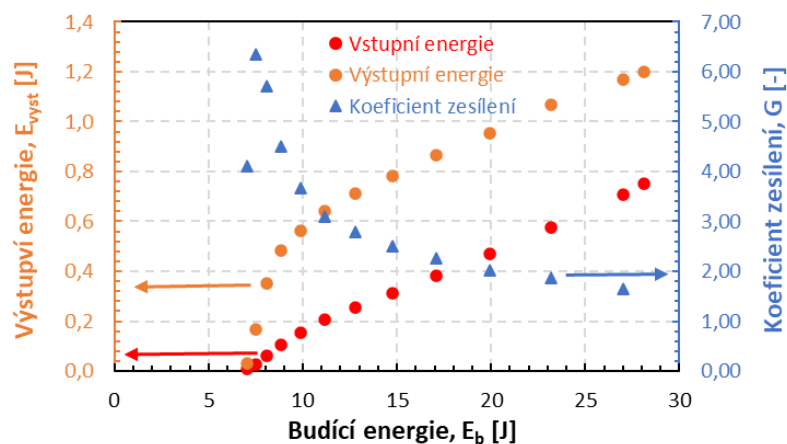


Obrázek 4 Závislost účinnosti na budící energii.

2.3 Zesilování laserového záření jednorůchodovým Nd:YAG zesilovačem

Výstupní záření Nd:YAG laseru pro optimální vstupní zrcadlo jsme zesilovali pomocí jednorůchodového Nd:YAG zesilovače. Určili jsme závislost zesílení G na budící energii (viz Obr. 4). Zesílení jsme vypočítali z podílu výstupní E_{vyst} a vstupní E_{vst} energie:

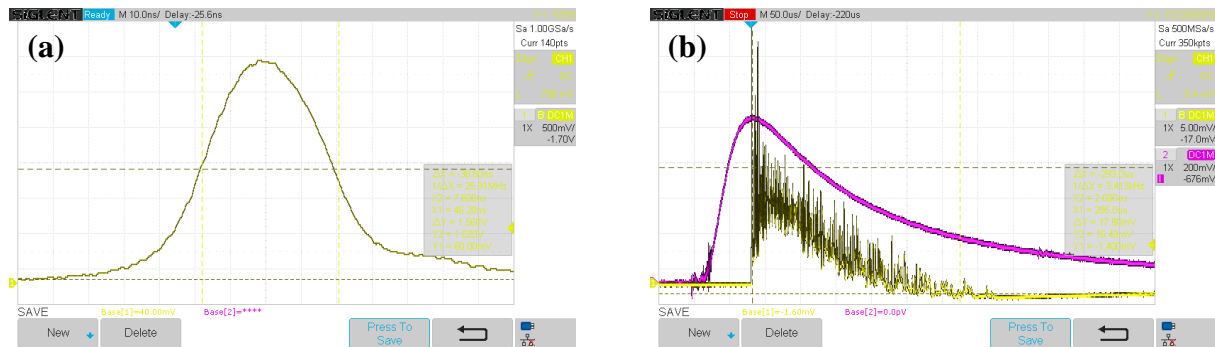
$$G = \frac{E_{\text{vyst}}}{E_{\text{vst}}} \quad (6)$$



Obrázek 5 Závislost zesílení, vstupní a výstupní energie na budící energii.

2.4 Generace a charakterizace krátkých Q-spínaných pulzů

Pro pasivní Q-spínání jsme do rezonátoru vložili krystal satureovatelného absorbéru Cr:YAG mezi totálně odrazné zrcadlo a aktivní prostředí laseru (viz Q1 v schématu na Obr. 1). Tím jsme získali krátké pulzy o délce $t_Q = 37,5 \pm 1,4$ ns (měřeno na polovině maximální intenzity) s energií $E_Q = 20,0 \pm 2,5$ mJ. To odpovídá špičkovému výkonu $P_Q = 534 \pm 51$ kW. Tyto hodnoty jsme získali průměrem z deseti měření. Na Obr. 6 jsou uvedeny pro srovnání dva oscilogramy Q-spínaného pulzu (6a) a pulzu ve volně běžícím režimu (6b).



Obrázek 6 Oscilogramy laserového záření (a) v režimu pasivního Q-spínání, (b) ve volně běžícím režimu.

3 Shrnutí

V rámci experimentální úlohy byly proměřovány základní charakteristiky laserového záření výbojkově čerpaného Nd:YAG laseru. Maximální výstupní energie ve volně běžícím režimu $E_{\max} = 753$ mJ byla dosažena s výstupním zrcadlem s odrazivostí $R = 48$ % na vlnové délce $\lambda = 1064$ nm, které odpovídala délka pulzu $t_p = 433$ μ s. Nejvyšší dosažená účinnost konverze budícího záření na laserové byla $\eta = 2,7$ %. Maximální plošná hustota výkonu laserového záření odpovídající výkonu $P_{\text{výst}} = 1,74$ kW byla stanovena na hodnotu $W = 13,84$ kW/cm².

Záření bylo následně zesíleno Nd:YAG jednopřechodovým zesilovačem. Maximální dosažené zesílení bylo $G_{\max} = 6,35$ pro budící energii $E_b = 7,5$ J. Maximální dosažená výstupní energie zesíleného záření byla $E_{\max} = 1,2$ J.

Po vložení satureovatelného absorbéru do dutiny rezonátoru jsme dosáhli generace krátkých Q-spínaných impulzů. Tím jsme získali krátké pulzy o délce $t_Q = 37,5 \pm 1,4$ ns s energií $E_Q = 20,0 \pm 2,5$ mJ, což odpovídá špičkovému výkonu $P_Q = 534 \pm 51$ kW.

Pro konverzi infračerveného záření do viditelné části spektra jsme využili nelineárního krystalu KDP (KH₂PO₄). Tím jsme ze záření o vlnové délce 1064 nm metodou generace druhé harmonické frekvence získali viditelné záření o vlnové délce 532 nm, což odpovídá zelené barvě.

Poděkování

Tímto bychom chtěli poděkovat všem organizátorům akce Týden vědy na Jaderce za možnost tvorby vlastního článku a za poskytnuté prostředky pro jeho vytvoření.

Reference

- [1] J.E. Geusic, H.M. Marcos, L.G. Van Uitert, Laser oscillations in Nd-doped Yttrium Aluminium, Yttrium Gallium and Gadolinium garnets, Appl. Phys. Lett. 4 (1964) 182–184. <https://doi.org/10.1063/1.1753928>.