

## Úloha 1: Pevnolátkový Nd:YAG laser v režimu volné generace a v režimu Q-spínání, zesilování laserového záření a generace druhé harmonické

Datum měření:	15.4.2015	Skupina:	G
Zpracoval:	David Roesel	Kruh:	FE
Spolupracovala:	Tereza Schönfeldová	Klasifikace:	

### 1 Úvod

V této úloze jsme si vyzkoušeli práci s pevnolátkovým Nd:YAG laserem. Nejprve v režimu volné generace a poté také v režimu Q-spínání jak v jednomódovém, tak ve vícemódovém sestavení. Dále jsme si vyzkoušeli zesilování laserového záření a generaci druhé harmonické pomocí KDP krystalu.

### 2 Postup a výsledky

Měření celé úlohy jsme prováděli v jednom schématu, které jsme během úlohy měnili dle potřeby. Většina prvků byla již na stole umístěna, ačkoliv nebyly zcela sladěny. Ověřili jsme tedy jejich zapojení vzhledem ke schématu v zadání [1].

#### 2.1 Charakteristika laseru v multimódovém režimu volné generace

Ze všeho nejdříve jsme ověřili, že střed krystalu oscilátoru je umístěn tak, aby skrze něj procházel svazek pomocného He-Ne laseru. Krystal byl nastaven správně a jeho pozici jsme tedy neměnili. Poté jsme nastavili laserový rezonátor metodou spřažení paprsků. Nejprve jsme upravili výstupní zrcadlo rezonátoru tak, aby odraz od něj vedl zpět do středu He-Ne laseru. Poté jsme do optické dráhy přidali zadní zrcadlo rezonátoru a učinili s ním totéž. Všimli jsme si, že jeden odraz (pravděpodobně od lesklé hrany aktivního prostředí) byl zjevně mimo střed aperтуры He-Ne laseru, ale asistent úlohy nás ujistil, že průchod svazku středem aktivního prostředí zajišťuje lepší generaci než přesný zpětný odraz.

Následně jsme spustili laser a donastavili ho na maximální výstupní energii pomocí jemného ladění zrcadel rezonátoru. Bylo jasně pozorovatelné, že se jedná o mnohem přesnější metodu než spřažení paprsků. Ověřili jsme také, že profil svazku má kulatý průřez. Následně jsme měli za úkol zjistit energii buzení. K tomu jsme využili tabulku na poslední straně zadání [1], která nám nastavené napětí  $U$  převedla na skutečné napětí  $U_r$ , a vzorec

$$E_b = \frac{1}{2}CU_r^2,$$

kde  $E_b$  je energie buzení a  $C = 100 \mu\text{F}$  kapacita kondenzátoru uvedená u úlohy i v zadání [1]. V tomto nastavení, tedy pro režim volné generace, jsme prahovou energii určili jako

$$E_{\text{th}} = 16,3 \text{ J}.$$

Dále jsme chtěli zjistit závislost výstupní energie  $E_{\text{out}}$  na energii buzení  $E_{\text{b}}$ . Měření jsme prováděli pro sklíčkem vytvořený odraz vedoucí na detektor s přepočtem  $15,8 \text{ V/J}$  napojený na osciloskop. Na čele detektoru ovšem byla matnice, která propouštěla dále pouze  $62\%$  přicházejícího záření, ze sklíčka se odrážela pouze asi  $4\%$  záření a v dráze svazku jsme zapomněli filtr s propustností  $82\%$ . Propustnost posledně zmíněného filtru jsme zpětně určili po měření jako poměr intenzity na detektoru před a po vložení filtru do dráhy svazku. Přepočet mezi naměřenou energií  $E$  a skutečnou energií  $E_{\text{out}}$  byl tedy

$$E_{\text{out}} = \frac{E}{0,04 \cdot 0,62 \cdot 0,82}. \quad (1)$$

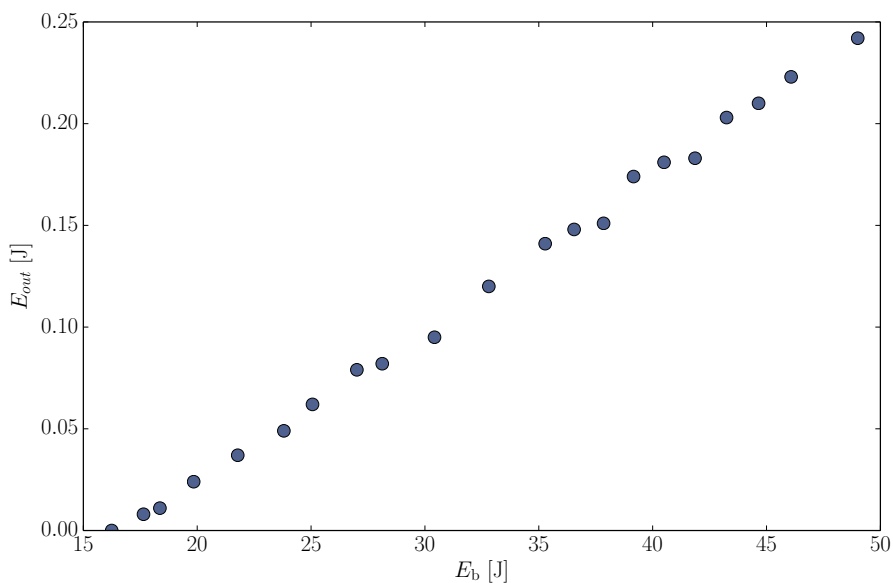
V tuto chvíli nám již nic nebránilo změřit závislost energie generace  $E_{\text{out}}$  na energii buzení  $E_{\text{b}}$  a naměřené hodnoty uvádíme v Tab. 7 a v grafu na Obr. 1. Ve stejné tabulce uvádíme hodnoty účinnosti  $\eta$ , spočítané jako podíl  $E_{\text{out}}$  ku  $E_{\text{b}}$ , které jsou také vyneseny v grafu na Obr. 2. Průměr svazku jsme určili pomocí mikrometrického měřítka jako

$$d_1 = 9,6 \text{ mm},$$

z čehož plyne obsah průřezu svazkem

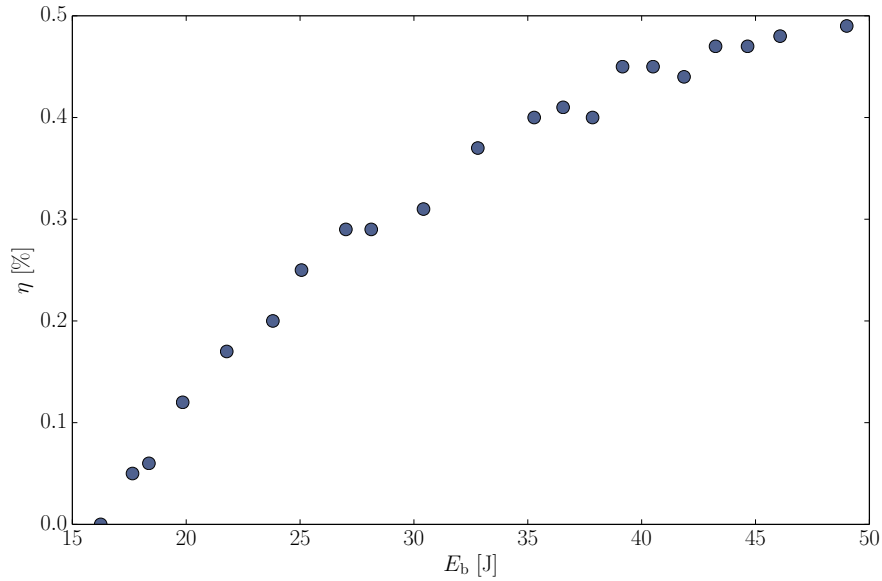
$$S = 72,4 \text{ mm}^2.$$

Z toho je snadné vypočítat plošnou hustotu energie jako  $W = E_{\text{out}}/S$ , jejíž závislost na  $E_{\text{b}}$  je uvedena ve stejné tabulce a vynesena v grafu na Obr. 3.

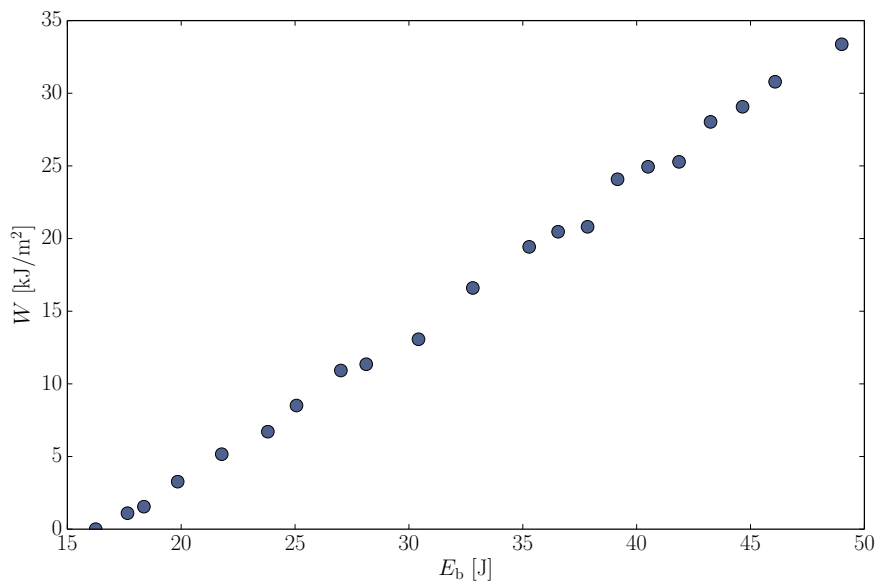


Obrázek 1: Závislost energie generace  $E_{\text{out}}$  na energii buzení  $E_{\text{b}}$ .

Pro tři hodnoty budící energie  $E_{\text{b}}$  (těsně nad prahovou energií, na maximální energii a v polovině mezi nimi) jsme pozorovali časový průběh na osciloskopu. Do toho signál přiváděla fotonka, která měřila mnohem jemněji časové průběhy. Z vykreslených průběhů jednotlivých pulzů jsme pomocí vertikálních kurzorů na osciloskopu odečetli dobu generace  $\tau_{\text{FR}}$  jako celkovou dobu obálky pozorovaného impulzu. Spolu s hodnotou výkonu  $P_{\text{str}}$  vypočítanou jako  $P_{\text{str}} = E_{\text{out}}/\tau_{\text{FR}}$  jsou naměřené hodnoty pro tyto tři budící energie uvedeny v Tab. 1. Závislost doby generace  $\tau_{\text{FR}}$  na budící energii  $E_{\text{b}}$  je vynesena pro tyto tři body v grafu na Obr. 4. Závislost středního výkonu  $P_{\text{str}}$  na budící energii  $E_{\text{b}}$  je pak vynesena do grafu na Obr. 5.



Obrázek 2: Závislost účinnosti  $\eta$  na energii buzení  $E_b$ .



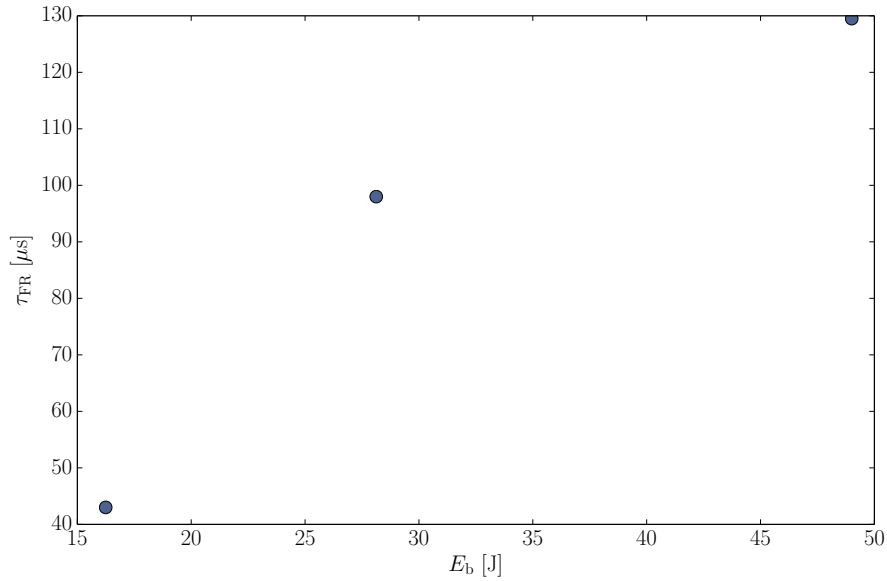
Obrázek 3: Závislost plošné hustoty energie generace  $W$  na energii buzení  $E_b$ .

$U$ [dílky]	$E_b$ [J]	$\tau_{FR}$ [ $\mu$ s]	$P_{str}$ [kW]
850	49,005	129,5	378,4
700	28,125	98,0	287,0
570	16,245	43,0	377,8

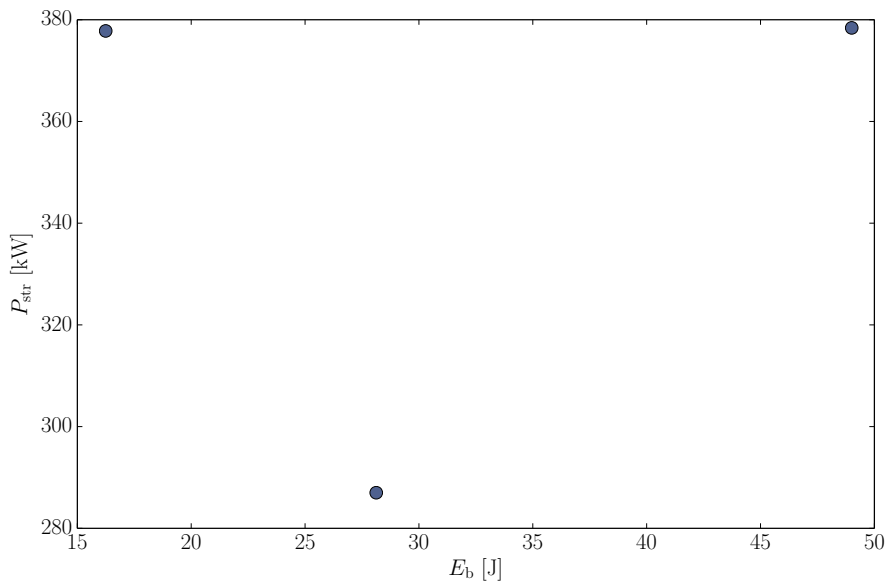
Tabulka 1: Naměřené hodnoty;  $U$  jsou dílky nastavené na zdroji napětí,  $E_b$  je z nich vypočítaná energie buzení,  $\tau_{FR}$  doba generace a  $P_{str}$  střední výkon pulsu.

## 2.2 Q-spínaný režim

V této fázi experimentu jsme si všimli zapomenutého filtru ve svazku s propustností 82% (viz výše) a odstranili jsme ho. Výpočty energie tedy probíhaly také podle vzorce (1), jen bez faktoru  $1/0,84$ . Pro určení plošné hustoty energie bylo třeba také znovu změřit průměr svazku. Ten jsme mikrometrickým šroubem určili jako



Obrázek 4: Závislost doby generace  $\tau_{FR}$  na budící energii  $E_b$ .



Obrázek 5: Závislost středního výkonu  $P_{str}$  na budící energii  $E_b$ .

$$d_2 = 3,2 \text{ mm},$$

z čehož plyne obsah průřezu svazkem

$$S_Q = 8 \text{ mm}^2.$$

Pro změnu z režimu volné generace na Q-spínání jsme vložili do dráhy svazku saturovatelný absorbér. Na rozdíl od zadání [1] jsme neměli k dispozici LiF krystal, ale Cr:YAG krystal od firmy Altechna (transmise na  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  zhruba 60%). Do svazku jsme ho vložili co nejvíce kolmo a snažili jsme se, aby svazek procházel středem absorbéru. Tímto jsme nastavili laser do režimu generace Q-spínaného impulsu v multimódovém režimu. Pozorovali jsme vývoj Q-spínaného impulsu a zaznamenali jsme po vlastním píku často propad pod nulu a další pík

o něco později. To přisuzujeme přítomnosti více příčných módů v rezonátoru. Mimo to jsme pozorovali zvýšení prahové budící energie. V režimu volné generace odpovídal práh hodnotě 550 dílků, po vložení saturovatelného absorbéru se tato hranice posunula na 690 dílků.

Pomocí obou dvou detektorů analogicky k předchozí podúloze jsme změřili délku, energii, výkon a plošnou hustotu deseti pulsů. U dvou přímo měřených veličin (délka a energie) jsme určili aritmetický průměr a směrodatnou odchylku. Na rozdíl od předchozí úlohy jsme dobu pulsu nebrali jako trvání od nuly, přes celý pulz a opět do nuly. Pulsy totiž měly mnohem hezčí průběh a využili jsme proto schopnost osciloskopu měřit jejich FWHM (nejprve jsme ale manuálním měřením pomocí kurzorů ověřili, že funkce osciloskopu vrací správnou hodnotu). Naměřené hodnoty pro Q-spínání v multimódovém režimu jsou zaznamenány v Tab. 2.

$\tau$ [ns]	$E_{\text{out}}$ [mJ]	$W$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$P$ [kW]
33,2	21,23	2,64	639,55
42,1	19,59	2,44	465,55
40,1	20,82	2,59	519,32
34,1	21,43	2,67	628,66
78,3	18,57	2,31	237,28
41,3	22,66	2,82	548,72
63,5	20,82	2,59	327,95
58,6	20,21	2,51	344,92
56,6	16,12	2,01	284,97
32,1	33,27	4,14	1036,73
aritm. průměr	50	21	
odchylka	10	4	

Tabulka 2: Naměřené hodnoty při Q-spínání ve vícemódovém režimu;  $\tau$  je doba trvání pulsu,  $E_{\text{out}}$  energie generace,  $W$  plošná hustota energie,  $P$  je výkon. Měření bylo prováděno za hodnoty budící energie  $E_b = 32,805$  J.

Dále jsme do rezonátoru umístili clonku a omezili tak generaci mnoha příčných módů. Opět jsme pozorovali časový vývoj Q-spínaného impulsu v tomto režimu, ale kromě absence propadu pod nulu jsme nepozorovali větší změnu. Některé pulsy dokonce stále obsahovaly další pík kromě toho hlavního. I pro “jednomódový” režim jsme určili stejné parametry deseti impulsů a vynesli je do Tab. 3. Pozorovali jsme také, že po vložení clonky opět stoupl práh generace. V měření obou režimů jsme nebyli na maximální budící energii. V obou případech jsme klesli tak nízko, abychom na osciloskopu pozorovali pouze jeden pulz, což nebyla stejná hodnota pro oba režimy. Pokud jsme na osciloskopu pozorovali více pulsů, všimli jsme si, že nebyly nikdy stejně velké a velice často ani nebyly ekvidistantně rozmístěny v čase.

### 2.3 Zesilování Q-spínaných impulsů

Jako další podúlohu jsme si zkoušeli zesilování Q-spínaných impulsů v jednomódovém režimu. Pro deset různých napětí nastavených na hlavním zdroji jsme proměřili energie bez zesílení  $E_0$  a zaznamenali jsme si je. Následně jsme vložili aktivní element laserového zesilovače do optické osy už nastaveného oscilátoru, přesunuli jsme odrazné sklíčko a detektory až za zesilovač a změřili jsme dalších deset hodnot energie pro zesílené pulsy  $E_{\text{out}}$ . Zajímala nás hodnota zesílení  $G$ , kterou jsme spočítali jako podíl  $G = E_{\text{out}}/E_0$ . Naměřené hodnoty z tohoto měření jsou vyneseny do Tab. 4 a závislost zesílení  $G$  na budící energii  $E_b$  je vynesena do grafu na Obr. 6. energii pulzů jsme zaznamenávali stejným detektorem jako dosud a k měření maxim jsme využívali funkci osciloskopu.

	$\tau$ [ns]	$E_{\text{out}}$ [mJ]	$W$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$P$ [kW]
	21,5	29,8	3,71	1386,42
	21,4	30,4	3,78	1421,52
	19,7	9,8	1,22	497,46
	22,8	27,2	3,38	1190,96
	20,4	9,2	1,14	450,36
	22,0	8,9	1,10	403,69
	20,6	7,8	0,96	376,61
	21,0	29,8	3,71	1419,43
	21,3	33,1	4,11	1552,80
	22,5	29,4	3,66	1306,66
aritm. průměr	21,3	20		
odchylka	0,9	10		

Tabulka 3: Naměřené hodnoty při Q-spínání v jednomódovém režimu;  $\tau$  je doba trvání pulsu,  $E_{\text{out}}$  energie generace,  $W$  plošná hustota energie,  $P$  je výkon. Měření bylo prováděno za hodnoty budící energie  $E_b = 40, 500$  J.

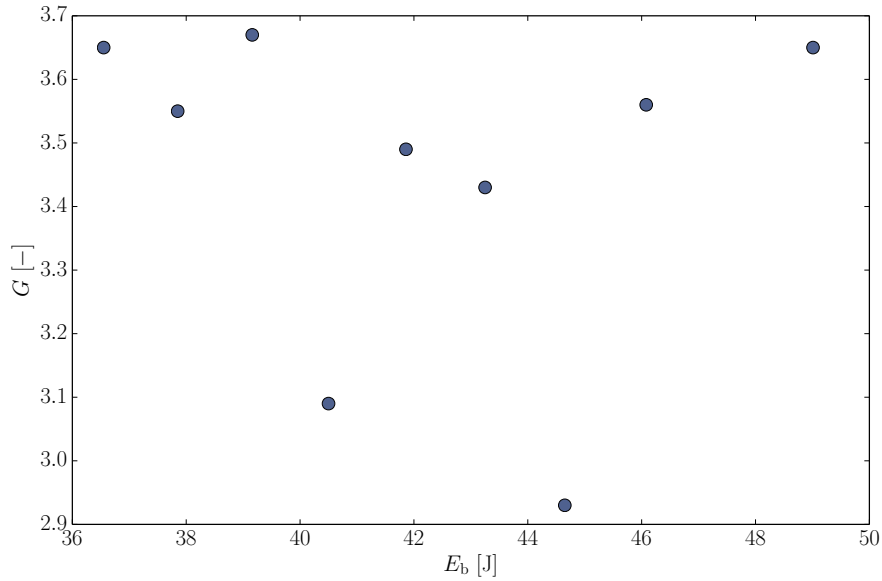
$U$ [dílký]	$E_b$ [J]	$E_0$ [mJ]	$E_{\text{out}}$ [mJ]	$G$ [-]
770	36,55	29,7	108,2	3,65
780	37,85	31,6	112,3	3,55
790	39,16	29,4	108,0	3,67
800	40,50	32,5	100,3	3,09
810	41,86	30,1	105,1	3,49
820	43,25	32,2	110,2	3,43
830	44,65	35,2	103,1	2,93
840	46,08	36,7	130,7	3,56
850	49,01	44,9	163,8	3,65

Tabulka 4: Naměřené hodnoty při zesilování Q-spínaných impulsů;  $U$  je napětí nastavené na zdroji,  $E_b$  z něj vypočítaná budící energie,  $E_0$  energie změřená bez zesilování,  $E_{\text{out}}$  energie se zesilovačem a  $G$  zesílení spočítané jako podíl  $E_{\text{out}}/E_0$ .

## 2.4 Generace druhé harmonické frekvence

Na závěr měření jsme si vyzkoušeli generaci druhé harmonické frekvence, která se často využívá pro zelená laserová ukazovátka. Použili jsme výstup zesilovače v jednopulzním, jednomódovém režimu. V dráze svazku jsme využili již vloženého KDP krystalu, který jsme jemně natáčeli mikrometrickým šroubem, dokud jsme na stínítku nepozorovali maximum intenzity zelené barvy. Tím jsme s dobrou přesností trefili úhel synchronismu. Následně jsme hledali závislost energie druhé harmonické frekvence na úhlu rozladění. Volili jsme krok stavěcího šroubu  $5 \mu\text{m}$ , v okolí maxima jsme ale změřili ještě jednu hodnotu navíc s menším krokem. Vzdálenost mezi osou otáčení a místem posunu mikrometrickým šroubem jsme určili pravítkem jako 8,7 cm, z čehož se z geometrie úlohy dá snadno dopočítat úhel vychýlení. Naměřená data pro hledání této závislosti jsou zanesena do Tab. 5 a znázorněna v grafu na Obr. 7. Druhé rameno grafu předpokládáme se stejným vývojem, proto jsme ho neproměřovali.

Poslední měření, které jsme uskutečnili, byla závislost energie druhé harmonické  $E_{2\omega}$  na energii záření vstupujícího do krystalu. Naměřené hodnoty jsou v relativních jednotkách a při uvažování lineárního zesílení tedy stačí závislost uvádět na  $E_b$ . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6 a v grafech jsou poté vyneseny závislost energie druhé harmonické  $E_{2\omega}$  na  $E_b$  (Obr. 8) a účinnosti  $\eta = E_{2\omega}/E_b$  opět na  $E_b$  (Obr. 9).



Obrázek 6: Naměřené hodnoty při zesilování Q-spínaných impulsů; závislost zesílení  $G$  na budící energii  $E_b$ .

$\alpha$ [°]	$E_{2\omega}$ [rel.jed.]
0,03	328,0
0,05	488,0
0,07	348,0
0,10	196,0
0,13	112,0
0,16	92,0
0,20	44,8
0,23	52,8
0,26	36,0
0,30	38,4
0,33	28,4
0,36	17,6
0,40	13,2
0,43	11,2

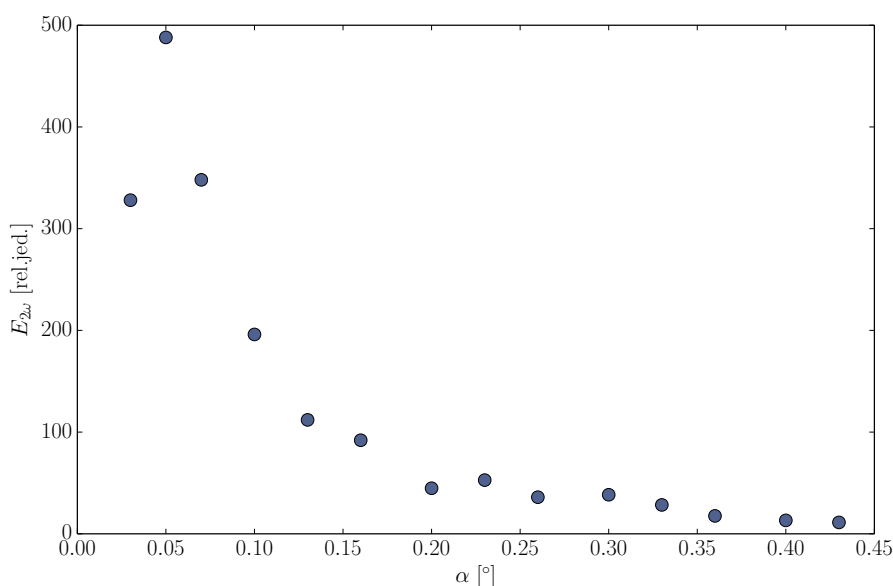
Tabulka 5: Naměřené hodnoty při generaci druhé harmonické frekvence; závislost energie druhé harmonické  $E_{2\omega}$  na úhlu vychýlení KDP krystalu z optimální polohy  $\alpha$ .

### 3 Diskuse a závěr

Tato úloha byla zajímavá tím, že jsme postupně do svazku přidávali další a další prvky, které nám vždy umožnili proměřit novou vlastnost některé části aparatury. Úspěšně jsme si vyzkoušeli metodu spřažení paprsků a podařilo se nám najít prahovou energii buzení. Prahová energie stoupala s každým dalším prvkem vloženým do rezonátoru, jelikož se v něm absorpcí zvýšily ztráty a bylo třeba větší budící energie pro splnění prahové podmínky. I přesto, že jsme při úvodním zapojení zapomněli ve svazku filtr s propustností 82 %, měření bylo i tak úspěšné, jelikož se chyba dala snadno početně vykompenzovat. Všechny požadované závislosti pro charakterizování laseru v multimódovém režimu volné generace se nám podařilo změřit. Účinnost laseru se pohybovala v řádu desetin procenta a laser byl efektivnější, čím vyšší byla budící energie. Závislost na Obr. 2 však ukazuje, že účinnost nejspíše neporoste donekonečna a bude

$U$ [dílký]	$E_b$ [J]	$E_{2\omega}$ [rel.jed.]	$\eta$ [rel.jed.]
720	30,42	146	4,80
740	32,81	204	6,22
760	35,28	264	7,48
770	36,55	315	8,62
780	37,85	322	8,51
790	39,16	364	9,29
800	40,50	383	9,46
810	41,86	416	9,94
820	43,25	414	9,57
830	44,65	449	10,06

Tabulka 6: Naměřené hodnoty při generaci druhé harmonické frekvence;  $U$  je napětí nastavené na zdroji,  $E_b$  budící energie,  $E_{2\omega}$  energie druhé harmonické a  $\eta$  relativní účinnost generace.



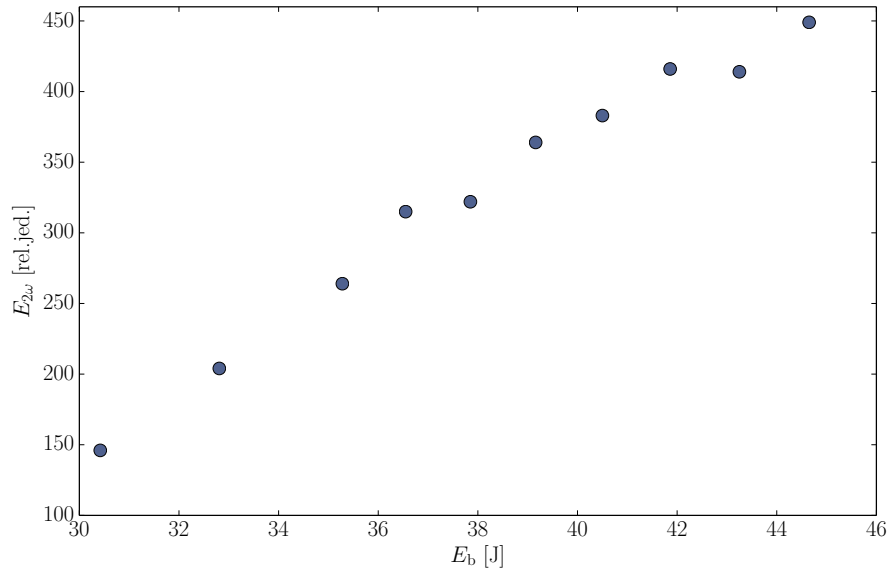
Obrázek 7: Závislost energie druhé harmonické  $E_{2\omega}$  na úhlu vychýlení  $\alpha$ .

se asymptoticky blížit nějaké hodnotě pod jedním procentem. Graf plošné hustoty (Obr. 3) vykresluje stejnou závislost jako graf výstupního výkonu (Obr. 1), je z něj však patrné, že je laser schopný dosahovat hustot energie v řádu  $\text{kJ/m}^2$ . Trvání jednotlivých pulzů se pohybovalo v řádu desítek  $\mu\text{s}$ , což odpovídalo výkonům ve stovkách  $\text{kW}$ . Vzhledem k tomu, že jsme časový průběh sledovali pouze u tří pulzů, nemůžeme příliš hodnotit naměřené závislosti. Můžeme učinit odhad, že délka trvání pulsu roste s budící energií, potažmo s energií pulsu.

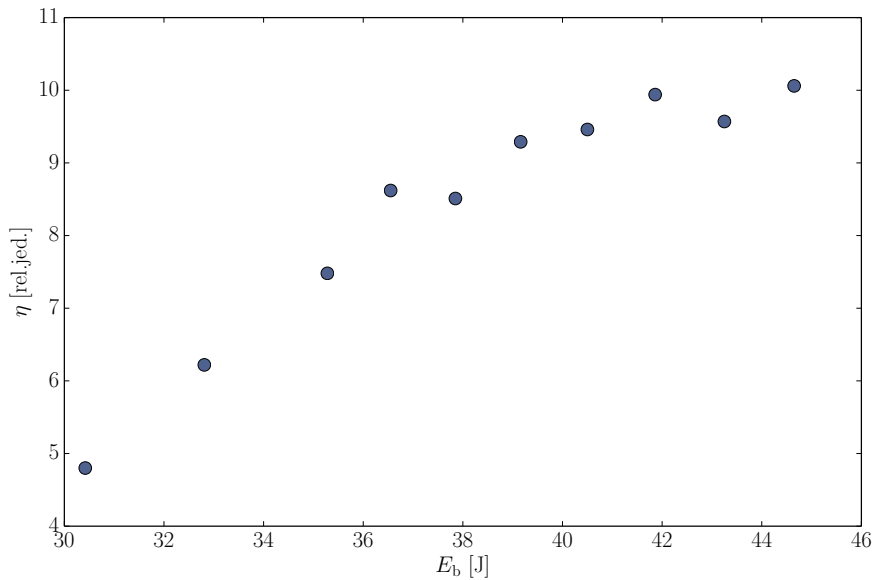
Všechny měření výstupní energie ovlivňovaly ztráty na sklíčku. Ty jsme po dohodě s asistentem odhadli na 4% vzhledem ke Snellovu zákonu pro indexy lomu odpovídající rozhraní vzduch-sklo. Vzhledem k tomu, že ale neznáme polarizaci laserového světla, je tato hodnota pouze odhadem a námi určené hodnoty mohou být zatíženy systematickou chybou.

Měření charakteristiky laseru v Q-spínaném módu se nám podařilo jak ve vícemódovém, tak v jednomódovém režimu. Ve vícemódovém režimu jsme naměřili relativně malou odchylku ve výstupní energii, ale odchylku větší v době trvání (FWHM) pulzu. Pro jednomódový režim tomu bylo přesně naopak, tedy odchylka trvání pulsu byla minimální, ale výstupní energie se měnila. Pulsy měly o několik řádů kratší trvání a vyšší výkon než v případě režimu volné generace. V tomto i v dalších měřeních jsme pozorovali, že pulsy neměly konstantní energii, ale celkem stabilně se držely dvou různých hodnot. Odchylky od těchto dvou hodnot nebyly výrazné, ale





Obrázek 8: Závislost energie druhé harmonické  $E_{2\omega}$  na budící energii  $E_b$ .



Obrázek 9: Závislost účinnosti  $\eta$  na budící energii  $E_b$ .

všem hodnotám dohromady to dává velký rozptyl. Způsobené to mohlo být saturovatelným absorbérem, stejně jako neekvidistantní rozmístění více pulzů při vyšších energiích buzení.

Měření zesilování Q-spínaných impulsů se nám také povedlo. Pozorovali jsme více než trojnásobné zesílení jednotlivých impulsů. Budeme-li považovat vybočující hodnoty za chyby měření, můžeme tvrdit, že zesílení  $G$  je s měnící se budící energií konstantní. Mírnou nepřesnost do tohoto měření mohlo opět vnést kolísání intenzity pulsů, případně měřící funkce osciloskopu.

Jako poslední jsme si úspěšně vyzkoušeli generaci druhé harmonické frekvence. I když původní vlnová délka  $\lambda = 1064\text{nm}$  není ve viditelném spektru, její druhá harmonická kolem  $532\text{nm}$  už ano. Z grafu na Obr. 5 je patrné, že jsme ověřili prudký pokles účinnosti v případě vzdalování od optimálního úhlu. Připomínáme, že všechny hodnoty naměřené pro druhou harmonickou jsou na detektoru bez jednotek a i z toho plyne účinnost vyšší než 100%. Při tomto měření hodnoty opět velice kolísaly - snažili jsme se proto z několika hodnot zanést vždy tu nejčastější.

## 4 Tabulky

$U$ [dílky]	$E_b$ [J]	$E_{\text{out}}$ [J]	$\eta$ [%]	$W$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
550	16,245	0,000	0,00	0,0
570	17,642	0,008	0,05	1,1
590	18,362	0,011	0,06	1,5
610	19,845	0,024	0,12	3,3
630	21,780	0,037	0,17	5,2
650	23,805	0,049	0,20	6,7
670	25,063	0,062	0,25	8,5
690	27,011	0,079	0,29	10,9
700	28,125	0,082	0,29	11,4
720	30,420	0,095	0,31	13,1
740	32,805	0,120	0,37	16,6
760	35,280	0,141	0,40	19,4
770	36,551	0,148	0,41	20,5
780	37,845	0,151	0,40	20,8
790	39,161	0,174	0,45	24,1
800	40,500	0,181	0,45	24,9
810	41,861	0,183	0,44	25,3
820	43,245	0,203	0,47	28,0
830	44,651	0,210	0,47	29,1
840	46,080	0,223	0,48	30,8
850	49,005	0,242	0,49	33,4

Tabulka 7: Naměřené hodnoty;  $U$  jsou dílky nastavené na zdroji napětí,  $E_b$  je z nich vypočítaná energie buzení,  $E_{\text{out}}$  je energie generace vypočítaná dle (1),  $\eta$  je účinnost vypočítaná jako  $E_{\text{out}}/E_b$  a  $W$  je plošná hustota energie spočítaná jako  $W = E_{\text{out}}/S$ , kde  $S$  je plocha svazku.

## Reference

- [1] *Návod k úloze 1 - Pevnolátkový Nd:YAG laser v režimu volné generace a v režimu Q-spínání, zesilování laserového záření a generace druhé harmonické* [online], [cit. 19. dubna 2015], <http://people.fjfi.cvut.cz/blazejos/public/ul1.pdf>