

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

LASERS DE FREQUÊNCIA ÚNICA DE ND:YLF E ND:YVO<sub>4</sub> NA  
REGIÃO DO VERMELHO

FABÍOLA DE ALMEIDA CAMARGO

Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau  
de Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:  
Dr. Niklaus Ursus Wetter

SÃO PAULO  
2010

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

LASERS DE FREQUÊNCIA ÚNICA DE ND:YLF E ND:YVO<sub>4</sub> NA  
REGIÃO DO VERMELHO

FABÍOLA DE ALMEIDA CAMARGO

Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau  
de Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:  
Dr. Niklaus Ursus Wetter

SÃO PAULO  
2010

*Dedico este trabalho à minha mãe, Vera, à minha irmã, Fernanda e ao meu pai, Lucio, que foram e sempre serão a base da minha vida. Mesmo longe meu coração estará sempre com vocês.*

**Billy**

## Agradecimentos

Ao Niklaus Ursus Wetter pela orientação, pela amizade e paciência durante esses 7 anos de convívio. Apesar de todas as nossas diferenças certamente nos lembraremos para sempre um do outro de uma maneira muito especial.

Je souhaiterai remercier spécialement Jean-Jacques Zondy, qui m'a reçu dans son laboratoire les bras ouverts. Je le remercie infiniment d'avoir cru en moi et en mon travail ainsi que de m'avoir encouragée dans toutes mes décisions. Il m'a enseigné beaucoup plus que de la physique et de l'optique non linéaire, il m'a appris comment nous pouvions faire notre travail et combien nous pouvions l'aimer. Et bien plus que tout cela, il m'a montré qu'un responsable pouvait être plus qu'un professeur qui vous guide, mais également un ami.

À toda a minha família que sempre me apoio e acreditou em mim.

Ao Jonas pelas inúmeras e pacientes discussões e sua tão importante presença sempre que precisei (e quando não precisei também).

Aos colegas do laboratório, Gustavo e Renato pelo convívio sempre agradável, pelo apoio e ajuda.

Aos amigos do CLA com quem passei ótimos momentos e que tornaram meus dias no CLA muito mais agradáveis, Ilka, Fabio, Fernando, Gerson, Horácio, Ivanildo, Melissa, Renata, Renato e Thiago.

Às minhas queridas amigas Ana Paula Aquino e Bianca Berberian que estiveram sempre ao meu lado em todos os momentos importantes da minha vida. Não sei o que seria de mim sem vocês duas.

Às minhas eternas amigas, Adriana Bobrow, Adriana Lage, Leila Sponton e Renata Duarte.

Ao meu querido amigo Gabriel Zarnauskas, mesmo estando longe você estará sempre presente na minha vida.

À Verônica pela paciência eterna comigo e por me apresentar um novo mundo que me trouxe tantas alegrias e paz em momentos difíceis.

Às amigas do Angra por me receber de braços abertos, apesar das nossas diferenças, especialmente à Fernanda.

Aos meus queridos amigos dos bons tempos em Paris, Jane, Lucas e Rodrigo. Espero que nossa amizade dure por muitas viagens ainda.

Ao Dr. Ricardo Elgul Samad, pela ajuda nas discussões sobre o meu trabalho.

Je remercie le Laboratoire National de métrologie et d'Essais pour le financement de mes travaux de thèse lors de mon séjour en France.

À Fapesp pelo projeto temático que financiou parte dos meus estudos e pela minha bolsa de doutorado.

Aos técnicos e funcionário do CLA.

Je tiens à remercier également l'Institut National de Métrologie pour m'avoir accueillie lors de ces 6 mois passés en France.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# LASERS DE FREQUÊNCIA ÚNICA DE Nd:YLF E Nd:YVO<sub>4</sub> NA REGIÃO DO VERMELHO

Fabíola de Almeida Camargo

## Resumo

Lasers de estado sólido sintonizáveis com uma estreita largura de linha de emissão na região do vermelho são uma alternativa conveniente aos lasers de corante para aplicações em espectroscopia de alta resolução. Nesse trabalho, foram investigados lasers contínuos de Nd:YLiF<sub>4</sub> e Nd:YVO<sub>4</sub> operando em frequência única na região de 1,32 - 1,34 $\mu$ m, assim como a geração de segundo harmônico (GSH) desses lasers usando cristais de BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> (BiBO) e KTiOPO<sub>4</sub> com inversão periódica de domínios (ppKTP), para a obtenção da emissão no vermelho (0,65 - 0,67 $\mu$ m).

Utilizando um laser de Nd:YVO<sub>4</sub> operando em frequência única em uma configuração em anel com um cristal não linear BiBO do tipo I, demonstrou-se o recorde de 680mW no vermelho em 671,1nm, sem a utilização de nenhum elemento seletivo. Uma sintonia em todo o ganho ( $\sim 4$  nm) foi obtida através da inserção de um etalon com filme refletor ( $R = 40\%$ ) e com 100 $\mu$ m de espessura, o que reduziu a potência de saída no vermelho para 380mW no comprimento de onda de maior ganho (671,15 nm). Em 1342nm foi demonstrada uma potência de saída de 1,5W em frequência única quando utilizado um espelho de saída com transmissão de 2%.

Foi demonstrado ainda uma ótima eficiência de conversão de segundo harmônico em um laser em anel de Nd:YLF na polarização  $\pi$  ( $\lambda = 1321,5$ nm) quando usando um cristal de ppKTP. Este laser forneceu 1,4W em frequência única no vermelho em 660,5 nm. Essa potência é a máxima que pode ser extraída desse laser no segundo harmônico e no fundamental quando utilizado um espelho com transmissão ótima. Utilizando um etalon com filme refletor ( $R = 25\%$ ), o laser pôde ser sintonizado em  $\Delta\lambda \sim 1,6$ nm.

# SINGLE FREQUENCY Nd:YLF AND Nd:YVO<sub>4</sub> LASER IN THE RED EMISSION

Fabiola de Almeida Camargo

## Abstract

All solid-state continuous-wave (cw) narrow emission linewidth and tunable red lasers are convenient alternative sources to bulky and expensive dye-lasers for high-precision laser spectroscopy. Single-frequency operation of diode-pumped Nd:YLiF<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> cw ring lasers were investigated in the 1.32 - 1.34 $\mu$ m range, together with their intracavity second-harmonic generation (SHG) to the red spectral range (0.65 - 0.67 $\mu$ m) using either BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> (BiBO) or periodically-poled KTiOPO<sub>4</sub> (ppKTP) crystals.

We report on such a single-end diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> unidirectional red ring laser containing a type-I cut BiBO nonlinear crystal, yielding a record of 680 mW of single-longitudinal mode (SLM) red output power at 671.1nm without any intra-cavity etalon. For smooth SLM wavelength tuning over the full gain bandwidth ( $\sim 4$  nm), a partially-coated (R = 40%) 100 $\mu$ m-thin etalon was found necessary, reducing the maximum SLM power (at 671.15 nm) to 380 mW. At 1342.5nm and with a T = 2% transmission output coupler, the laser provided an optimal 1.5W of single-frequency power.

We demonstrate also optimal intracavity SHG of a Nd:YLF ring laser in the  $\pi$ -polarization ( $\lambda = 1321.5$ nm) using a ppKTP. The laser yielded 1.4 W of single-frequency red power at 660.5 nm, as much as the maximum fundamental power that can be extracted from the resonator using an optimal output coupler. With a partially-coated (R = 25%) thin etalon, the laser was tunable over  $\Delta\lambda \sim 1.6$ nm.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Óptica não linear</b>	<b>4</b>
2.1	Interação da radiação com meios não lineares . . . . .	4
2.2	Geração de segundo harmônico . . . . .	6
2.2.1	Relações de simetria no tensor de susceptibilidade não-linear . . . . .	7
2.2.2	Geração de segundo harmônico de uma onda plana . . . . .	8
2.2.3	Valor efetivo do $d_{ijk}$ . . . . .	13
2.2.4	Geração de segundo harmônicos de feixes gaussianos focados . . . . .	14
2.2.5	Limitação na geração do segundo harmônico . . . . .	21
2.2.6	Potência máxima gerada no segundo harmônico . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Laser de neodímio na região do vermelho</b>	<b>28</b>
3.1	Matrizes laser . . . . .	28
3.2	Obtenção de lasers na região do vermelho . . . . .	31
3.3	Lasers operando em frequência única . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Procedimento experimental</b>	<b>35</b>
4.1	Projeto Nd:YVO <sub>4</sub> . . . . .	35
4.2	Projeto Nd:YLF . . . . .	38
4.2.1	Caracterização do cristal de ppKTP . . . . .	38
4.2.2	Ressonador de Nd:YLF . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Resultados e discussões</b>	<b>42</b>
5.1	Projeto Nd:YVO <sub>4</sub> . . . . .	42
5.2	Projeto Nd:YLF . . . . .	49
5.2.1	Caracterização do cristal de ppKTP . . . . .	49



5.2.2 Ressonador de Nd:YLF . . . . .	52
<b>6 Conclusões</b>	<b>57</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>59</b>

# Lista de Figuras

2.1	Potência relativa no segundo harmônico em função do casamento de fase. . . . .	9
2.2	Elipsoides dos índices de refração do comprimento de onda fundamental (linha pontilhada) e do segundo harmônico (linha cheia) em um cristal uniaxial negativo. . . . .	11
2.3	Esquema da geração de segundo harmônico de um feixe gaussiano focalizado dentro de um cristal não linear do tipo I (ooe). . . . .	15
2.4	Simulação da eficiência de conversão do SH em função do $d_{\text{eff}}$ para um cristal do tipo I ooe com comprimento igual a 1 cm e <i>walk-off</i> igual a $1^\circ$ . . . . .	20
2.5	Simulação da eficiência de conversão do SH em função do ângulo de <i>walk-off</i> para um cristal do tipo I ooe com comprimento igual a 1 cm e com um $d_{\text{eff}} = 2\text{pm/V}$ . . . . .	20
2.6	Simulação da eficiência de conversão do SH em função comprimento de um cristal do tipo I ooe para um <i>walk-off</i> igual a zero e um $d_{\text{eff}} = 2\text{pm/V}$ . . . . .	21
2.7	Comportamento da potência no segundo harmônico em função de $\sqrt{y}$ . . . . .	27
3.1	a) Simulação da eficiência de conversão do BiBO utilizado nesse projeto em função do raio do feixe laser dentro do cristal. b) Simulação da eficiência de conversão do ppKTP utilizado nesse projeto em função do raio do feixe laser dentro do cristal. . . . .	33
4.1	Ressonador em anel com o cristal não linear intracavidade utilizado para a obtenção do comprimento de onda de 670,97nm. . . . .	37
4.2	Configuração de geração de segundo harmônico extracavidade para a caracterização do ppKTP. . . . .	39
4.3	Foto do laser de Nd:YLF com o cristal ppKTP intracavidade. . . . .	41

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

