

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

**ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO  
DE UM LASER DE Er<sup>3+</sup>:YLF EMITINDO NA REGIÃO  
DE 3μm BOMBEADO POR DIODO**

ALESSANDRO MELO DEANA

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

Orientador:  
Dr. Niklaus Ursus Wetter.

SÃO PAULO  
2008

**DEDICATÓRIA:**

Para meus pais.

## **AGRADECIMENTOS:**

Agradeço ao Dr. Niklaus U. Wetter por ter orientado este trabalho.

Agradeço ao IPEN por ter disponibilizado a infra-estrutura para a realização deste trabalho.

Agradeço a CAPES, FAPESP e CNPq pelo apoio financeiro.

Agradeço ao Dr. Laércio Gomes pelas longas e proveitosas discussões, e por ceder equipamentos e o próprio laboratório para que esta tese pudesse ser realizada.

Agradeço à Profa. Dra. Sonia L. Baldochi e Dra. Izilda M. Ranieri por terem fornecido o cristal sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço ao Dr. Spero P. Morado e o Prof. Dr. Edison P. Maldonado por terem orientado meus primeiros passos na iniciação científica me mostrando o “caminho da luz”.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo R. Pascholati, por ter me ensinado a ensinar, oferecendo a oportunidade de trabalhar em seu grupo de professores.

Agradeço ao Dr. Paulo S. F. de Matos pelas discussões e ensinamentos sem os quais esta tese não teria sido realizada.

Agradeço aos meus pais José e Ivani, por terem sido os maiores e melhores orientadores que já tive, e por terem me apoiado desde o início desta jornada.

Agradeço ao meu irmão Alex M. Deana por ser um irmão para mim.

Agradeço aos grandes amigos e “tios” Elis e Adriana pela amizade e apoio incondicionais, e por terem me encorajado a seguir a carreira como físico.

Agradeço ao amigo Marco A. Ferrari pela oportunidade oferecida e por estar sempre disposto a ajudar.

Agradeço aos amigos, Marcus P. Rael, Marcello M. Amaral, Ilka T. Kato, Aécio Yamada e Melissa Folgosi-Correa pela amizade, conselhos e companheirismo, sem os quais esta jornada teria sido muito mais difícil.

Agradeço aos amigos Renato Prates e Luiz C. Suzuki pela amizade, conselhos, companheirismo e por terem arrancado meus dentes.

## **EPÍGRAFE:**

"Se uma coisa parece difícil de fazer, não deve ser feita!"

Homer Simpson.

# **ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UM LASER DE Er<sup>3+</sup>:YLF EMITINDO NA REGIÃO DE 3μm BOMBEADO POR DIODO**

**Alessandro Melo Deana**

## **RESUMO:**

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema laser utilizando como meio ativo um cristal de YLF cortado em ângulo de Brewster e dopado com 15mol% de érbio substituindo o ítrio, emitindo na região dos 3 μm e bombeado por diodo laser com pico de emissão em 975 nm. Com este sistema foi obtido 1,80(18) W operando em regime quase-contínuo. O oscilador foi otimizado para aplicações médicas operando com potência máxima em 250 μs de tempo de pulso. O peculiar comportamento temporal do laser foi estudado neste trabalho pela primeira vez, assim como a otimização da potência máxima em função da duração do pulso.

Há diferenças nos mecanismos intrínsecos do laser quando este é operado em regime contínuo ou pulsado, especialmente no efeito da transferência de energia por conversão ascendente  $W_{22}$ , cujo valor ainda é muito divergente na literatura. O valor estimado neste trabalho para este parâmetro de transferência de energia é  $2,0 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

# **STUDY, DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF A DIODE PUMPED Er<sup>3+</sup>:YLF LASER EMMITING IN THE 3μm REGION**

**Alessandro Melo Deana**

## **ABSTRACT:**

In this work we present the development of a laser system based on an Er:YLF Brewster cut crystal with 15mol% erbium at the yttrium site, emitting at 3 μm and pumped by a laser diode emitting at 975 nm. Using this system we obtained 1,80(18) W peak power when operating in the quasi-continuous regime. The cavity is optimized for medical applications and to operate at maximum power when pumped with 250 μs pulse duration. The unique temporal behavior of this laser was subject of this study for the first time, as the optimization of the maximum output power as a function of the pulse duration. There are differences in the intrinsic mechanism of the laser when it is operated in pulsed or cw condition, especially with respect to the effect of the  $W_{22}$  energy transfer upconversion parameter which value in the literature is very divergent. The estimated value of this process was also obtained in this work and is  $2,0 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

## SUMÁRIO:

DEDICATÓRIA: .....	i
AGRADECIMENTOS: .....	ii
EPÍGRAFE: .....	iv
RESUMO: .....	v
ABSTRACT: .....	vi
SUMÁRIO: .....	vii
LISTA DE FIGURAS: .....	ix
LISTA DE TABELAS: .....	xiii
1. INTRODUÇÃO: .....	1
1.1 Objetivo: .....	2
1.2 O laser de érbio emitindo em 3 $\mu$ m: .....	2
1.3 Operação em regime contínuo: .....	4
1.4 Sistema de bombeamento para o Er:YLF: .....	5
1.5 As equações de taxa: .....	6
1.6 Estado da arte: Lasers com emissão em 3 $\mu$ m .....	11
2 ARRANJO EXPERIMENTAL: .....	12
2.1 O sistema de bombeamento: .....	12
2.2 O meio ativo: .....	14
2.3 O oscilador principal: .....	16
2.4 O amplificador: .....	18
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES: .....	20
3.1 Estudo teórico dos parâmetros do laser: .....	20
3.1.1 A simulação do laser: .....	20
3.1.2 Estudo dos mecanismos do laser em regimes contínuo e pulsado: .....	25
3.1.3 Simulações da variação dos parâmetros do laser: .....	31
3.1.3.1 Relaxação cruzada $W_{50} (^4S_{3/2} + ^2H_{11/2}, ^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}, ^4I_{11/2})$ : .....	32
3.1.3.2 Absorção do estado excitado ( $^4I_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$ ): .....	35
3.1.3.3 Transferências de energia por conversão ascendente: .....	38



3.1.4	Proposta para simplificação das equações de taxa: .....	49
3.2	Resultados Experimentais: .....	52
3.2.1	Operação na região de oscilações de relaxação: .....	56
3.2.2	Operação com pulsos longos: .....	59
3.2.3	Otimização do sistema para a duração de pulso: .....	69
4	CONCLUSÃO: .....	72
5	Anexo A – Introdução teórica à física de laser: .....	74
5.1	Desenvolvimento teórico de lasers de estado sólido: .....	74
5.2	Os coeficientes de Einstein: .....	75
5.3	Linhas atômicas: .....	77
5.4	Ganho e absorção: .....	78
5.5	O laser de três níveis: .....	80
5.6	O laser de quatro níveis: .....	83
5.7	A taxa de bombeamento: .....	85
5.8	A saturação de ganho do laser: .....	86
5.9	As equações de taxa do ressonador: .....	87
5.10	Limiar de operação e potência de saída do laser: .....	92
5.11	Análise de Findlay-Clay para perdas no ressonador: .....	93
5.12	Oscilações de relaxação: .....	94
5.13	Amplificador de potência do oscilador principal (MOPA): .....	96
5.14	Mecanismos de transferência de energia: .....	97
	BIBLIOGRAFIA: .....	99

## LISTA DE FIGURAS:

Figura 1.1 – Esquema de níveis do Er:YLF indicando os processos relevantes. GSA (Absorção do estado fundamental, $R_{02}$ ) e ESA (Absorção do estado excitado, $R_{26}$ ) são indicados apenas para bombeamento em 975nm. ....	3
Figura 2.1 – $M^2$ do diodo laser obtido a partir do método da varredura de faca <sup>[54]</sup> .....	13
Figura 2.2 – Espectro do diodo a 25°C. ....	13
Figura 2.3 – Eficiência elétrica e limiar de funcionamento do diodo de bombeamento do ressonador principal. ....	14
Figura 2.4 – a) Cristal volumétrico ( <i>bulk crystal</i> ) crescido no CLA e b) amostra cortada e polida para ser utilizada como meio ativo do laser. A linha sólida representa o eixo de crescimento dos cristais (eixo “c”).....	14
Figura 2.5 – Espectro de absorção do cristal de Er:YLF utilizado no desenvolvimento deste laser. ....	15
Figura 2.6 – Representação esquemática do ressonador; 1. Diodo laser acoplado em fibra; 2. Telescópio colimador de feixe; 3. Espelho de entrada altamente refletor em 2800 nm; 4. Meio ativo de Er:YLF; 5. Espelho de saída com 1,4% de transmissão em 2800 nm. ....	17
Figura 2.7 – Fotografia do ressonador principal mostrando: 1. Detector de energia piroelétrico; 2. Telescópio colimador de feixe; 3. Espelho de entrada altamente refletor em 2800 nm; 4. Meio ativo de Érbio:YLF; 5. Espelho de saída com 1,4% de transmissão em 2800 nm. ....	17
Figura 2.8 – Representação esquemática do ressonador com um estágio de amplificação: 1. Diodo laser acoplado em fibra; 2. Telescópio colimador de feixe; 3. Espelho de entrada altamente refletor; 4. Meio ativo de Er:YLF; 5. Espelho de saída com 1,4% de transmissão em 2800 nm; 6. Diodo laser pulsado com 100 W de potência pico; 7. Lente de colimação do feixe de bombeamento do amplificador; 8. Cristal de Er:YLF do amplificador. ....	18
Figura 2.9 – Espectro de emissão típico dos diodos disponíveis para bombear o amplificador. ....	19
Figura 3.1 – Densidade de população do nível $^4I_{15/2}$ (fundamental) em função do tempo. ....	21
Figura 3.2 – Densidade de população do nível $^4I_{11/2}$ (superior) e $^4I_{13/2}$ (inferior) em função do tempo.....	21
Figura 3.3 – Densidade de população do nível $^4I_{11/2}$ (superior) e $^4I_{13/2}$ (inferior) multiplicada pelo fator de ocupação de Boltzman em função do tempo. ....	22
Figura 3.4 – Densidade de população dos níveis $^4I_{9/2}$ , $^4F_{9/2}$ , $^4S_{3/2}$ e $^4F_{6/2}$ em função do tempo. ....	22

## 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:

