



Michele Figueiredo Moreira

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE
UM SISTEMA LASER DE CRISTAL LÍQUIDO
COLESTÉRICO ACOPLADO À FIBRA ÓPTICA**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Física do Departamento de Física da PUC-Rio
como requisito parcial para obtenção do título de
Doutor em Ciências – Física.

Orientadora: Profa. Isabel C. S. Carvalho
Co-orientador: Prof. Peter Palffy-Muhoray

**Rio de Janeiro
Maio de 2004**



Michele Figueiredo Moreira

**Desenvolvimento e Caracterização de um
Sistema Laser de Cristal Líquido Colestérico
Acoplado à Fibra Óptica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências – Física. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Isabel Cristina dos Santos Carvalho

Orientadora
Departamento de Física – PUC-Rio

Peter Palffy-Muhoray

Co-orientador
Liquid Crystal Institute - KSU

Antonio Martins Figueiredo Neto

Instituto de Física – USP

Luiz Carlos Guedes Valente

Gávea Sensors

Marco Cremona

Departamento de Física – PUC-Rio

Paula Medeiros Proença de Gouvêa

Pós-MQI Metrologia – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 7 de maio de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Michele Figueiredo Moreira

Graduou-se em Física na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 1997. Coursou Mestrado em Física na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 2000. Área de atuação é propriedades ópticas e espectroscopia da matéria condensada, dispositivos optoeletrônicos e cristais líquidos.

Ficha Catalográfica

Moreira, Michele Figueiredo

Desenvolvimento e caracterização de um sistema laser de cristal líquido colestérico acoplado à fibra óptica / Michele Figueiredo Moreira ; orientadora: Isabel C. S. Carvalho ; co-orientador: Peter Palffy-Muhoray. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Física, 2004.

140 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Teses. 2. Sensor. 3. Laser de cristal líquido colestérico. 4. Fibras ópticas. I. Carvalho, Isabel C. S. II. Palffy-Muhoray, Peter. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. IV. Título.

CDD: 530

Para meus pais, Célia e Wenceslau
Moreira, pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus acima de tudo.

Para iniciar agradeço a meus pais, Célia e Wenceslau, pelo apoio incondicional à minha escolha profissional e por tudo que fizeram para que eu chegasse até aqui. Não esquecendo também de minha irmã Gisele, minha tia Nazaré e do Cláudio que sempre me ajudaram nas horas difíceis e me deram apoio na realização deste trabalho e em vários momentos de minha vida.

Grande parte desse momento também se deve ao meu padrinho Cesário a quem devo muito dos momentos mais felizes de minha vida e apoio incondicional para a minha realização profissional. Sempre disposto a me ajudar e nunca deixando de torcer pela minha vitória. Não esquecendo também da minha tia Célia pelo incentivo para realização de meus sonhos.

A minha orientadora, professora Isabel Carvalho, dedico os mais sinceros agradecimentos pela paciência, confiança, dedicação e amizade. Além disso, agradeço também pelas discussões e apoio constante ao longo desta tese.

Agradeço ao meu co-orientador Prof. Peter Palffy-Muhoray pela oportunidade de trabalhar na área de cristais líquido, pelo apoio, confiança e amizade. Agradeço também pelas discussões e idéias para a realização desta tese, e por me permitir interagir e trabalhar com o seu grupo nos Estados Unidos.

Aos professores Luiz Carlos Guedes e Bernhard Lesche, pelas discussões, idéias e apoio ao longo do desenvolvimento desta tese.

Ao professor Luiz Fernando Alzuguir Azevedo por permitir o uso do laser do Laboratório de Termociências do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Aos meus amigos Whaulkuer e Pedro, companheiros de jornada durante alguns anos juntos na PUC. Sou grata pela torcida, pela ajuda e pela amizade que ainda mantemos mesmo estando distantes. Além disso, agradeço pelos momentos importantes de discussões sobre a Física e demais tópicos que me levaram a enriquecer meus conhecimentos sobre a nossa área de trabalho e sobre a vida em geral.

A colaboração de Paula Gouvêa durante a minha estada no laboratório e pela ajuda preciosa em vários momentos, não podem deixar de ser mencionada. Assim como a amizade e apoio que nunca serão esquecidos.

Ao Thomas Ogier pela colaboração em várias medidas realizadas no Laboratório de Optoeletrônica durante sua estadia no Brasil. Além da grande amizade construída durante este tempo e pelo apoio para a realização deste trabalho. Agradeço também ao Jean Garcia pelo apoio e amizade.

Aos colegas e amigos da PUC: Eduardo Thiesen, Caroline Franco, Gladys Quintero, Arthur Wilson e demais colegas pelo apoio, companheirismo e amizade durante estes anos. E aos amigos, Marie Barbera, Antigone Marino, Ye Yin, Wenyi Cao e Chris Bailey pelo apoio durante minha estadia nos Estados Unidos.

Não foram poucas as vezes que recorri ao Zanelli e ao João, da oficina mecânica, e ao Hélio e Wellington, para que peças e outras coisas fossem feitas quase sempre com urgência.

Lembrando também do apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) sem o qual não seria possível realizar o trabalho aqui descrito.

À Raquel, Giza, Nélia e Márcia, secretárias do Departamento de Física. Ao Julinho da xerox, e a todos os demais funcionários do Departamento de Física da PUC, pelo respeito e carinho com que sempre me trataram neste período.

Por último, nem por isso menos importante, as pessoas que não estão diretamente ligados a realização do trabalho mas que como grandes amigos devem ser citados, Eraldo Soares, Adriana, Regina, Edson, Juliana, Mariana e Monique. Além dos meus sobrinhos, Arthur, Ana Caroline e Victória pelo carinho a mim sempre dedicado.

A todas aquelas pessoas que involuntariamente posso ter esquecido e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Devo agradecer também ao Governo Brasileiro pelo apoio financeiro através de sua instituição o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico Pesquisas (CNPq) que forneceu o suporte financeiro para a realização do projeto de colaboração internacional (CNPq/NSF) com o Instituto de Cristal Líquido da Universidade de Kent (KSU/USA).

Resumo

Neste trabalho estudamos a viabilidade do desenvolvimento de um sistema laser de cristal líquido colestérico (CLC) acoplado a fibra óptica visando sua aplicação como um sensor de temperatura. Sensores laser de CLC acoplados a fibra óptica são atrativos devido às enormes vantagens que as fibras ópticas apresentam e à resposta de cristais líquidos a vários estímulos externos. A emissão laser de CLC ocorre na banda de menor energia da banda de reflexão, e corresponde a um comprimento de onda determinado pelo passo e pelo índice de refração extraordinário. Esses parâmetros podem ser alterados pela mudança da temperatura externa, proporcionando variações no comprimento de onda do laser de CLC. Essas variações no comprimento de onda do laser de CLC podem ser usadas para monitorar a temperatura.

Obtivemos emissão laser estável num sistema laser CLC acoplado à fibra óptica quando bombeado pelo segundo harmônico de um laser de Nd:YAG e desenvolvemos uma técnica para ancorar o cristal líquido nas extremidades das fibras ópticas. A dependência da emissão laser com a temperatura foi investigada em duas situações, posicionando o laser de CLC entre fibras ópticas e em células de vidro. Diversos cristais líquidos foram estudados a fim de se otimizar a resposta do laser com a temperatura. Variações discretas na dependência do comprimento de onda da emissão laser foram observadas no sistema que utilizava as células de vidro. Associamos esse comportamento à dependência do ancoramento das moléculas do cristal líquido na superfície do vidro com a temperatura.

Palavras-chave

Fibra Óptica, Cristal líquido, Laser de Cristal Líquido Colestérico, Sensor.

Abstract

In this work, we have studied the viability of developing a cholesteric liquid crystal (CLC) laser system coupled into an optical fiber aiming its application as temperature sensor. Sensors made of CLC laser coupled to optical fibers are a very attractive proposition due to the enormous advantages of the optical fibers and the response of the liquid crystal to various external stimuli. The laser emission occurs at the low energy edge of the reflection band, and the corresponding wavelength is determined by the pitch and the extraordinary refractive index. These parameters can be altered by a change in the external temperature, leading to variations in the wavelength of the CLC laser emission, which can be used to monitor the external temperature.

We obtained a stable laser emission in a CLC laser system coupled into an optical fiber when pumped by the second harmonic of a Nd:YAG laser. A technique to anchor the liquid crystal at the optical fibers ends was developed. The temperature dependence of the laser emission was investigated in two situations, placing the CLC laser between optical fibers and into the glass cells. Several liquid crystals were studied in order to optimize the laser response with temperature. Discrete variations in the temperature dependence of the laser emission wavelength were observed when the glass cell system was used. We associated this behavior to a temperature dependence of the surface anchoring of the liquid crystal molecules in the glass surface.

Keywords

Optical Fiber, Liquid Crystal, Cholesteric Liquid Crystal Laser, Sensor.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	22
Capítulo 2 – Fibras Ópticas	25
2.1 Introdução	25
2.2 Fabricação e Geometria de Fibras Ópticas	26
2.2.1 Fibras de índice degrau	28
2.2.2 Fibras de índice gradual	30
2.3 Propagação de Onda em Fibras	30
2.3.1 Equações de Maxwell	30
2.3.2 Modos ópticos das fibras	32
2.4 Atenuação e Dispersão em Fibras Ópticas	33
2.5 Fibras Especiais	34
2.6 Vantagens das Fibras Ópticas	37
2.7 Sensores a Fibra Óptica	38
2.7.1 Redes de Bragg em Fibras	40
Capítulo 3 – Laser	44
3.1 Histórico	44
3.2 Princípio Básico de Funcionamento	45
3.3 Emissão e Absorção	46

Capítulo 4 – Cristais Líquidos	50
4.1 Histórico	50
4.2 Cristal Líquido	51
4.3 Tipos de Cristal Líquido.....	54
4.3.1 Termotrópicos.....	55
4.4 Classificação dos Cristais Líquidos	55
4.4.1 Nemáticos	55
4.4.2 Esméticos.....	56
4.4.3 Colestéricos.....	57
Capítulo 5 – Cristal Líquido Colestérico	59
5.1 Introdução	59
5.2 Tipos de Ancoramento	60
5.3 Propagação da Luz nos Colestéricos.....	61
5.4 Dependência do Índice de Refração com a Temperatura	69
5.5 Estrutura Colestérica.....	78
5.6 Reflexão Seletiva	80
5.7 Medida do Passo da Hélice.....	82
5.8 Aplicações	84
5.8.1 Sensores	85
5.8.2 Laser de cristal líquido colestérico.....	86
5.9 Variação do Passo da Hélice com a Temperatura	88
Capítulo 6 – Influência da Temperatura na Emissão Laser do Cristal Líquido Colestérico	92
6.1 Introdução	92
6.2 Preparação das amostras	93

6.3	Caracterização das amostras.....	95
6.4	Emissão laser do CLC para diferentes taxas de repetição do laser de bombeio	102
6.5	Sistema laser de cristal líquido colestérico acoplado a uma fibra óptica.....	107
6.5.1	Sistema fibra óptica e laser de cristal líquido	107
6.5.2	Ancoramento do cristal líquido	108
6.5.3	Montagem experimental	111
6.5.4	Resultados e Discussões	113
6.6	Determinação do passo da hélice	115
6.6.1	Montagem experimental	115
6.6.2	Resultados e Discussões	116
6.7	Emissão laser do CLC em células de vidro.....	121
6.7.1	Montagem experimental	121
6.7.2	Resultados e Discussões	122
	Capítulo 7 – Conclusões e Perspectivas.....	131
	Referências Bibliográficas	134
	Anexo1.....	140

Lista de Figuras

Fig. 2.1. Seção transversal de uma fibra óptica e perfil do índice de refração de uma fibra de (a) índice gradual e (b) índice degrau [3].	27
Fig. 2.2. Raios luminosos em uma fibra de índice degrau.	28
Fig. 2.3. Perfis do índice de refração encontrados para fibras de dispersão deslocada.	35
Fig. 2.4. Distribuição dos trabalhos apresentados OFS-15 de acordo com (a) grandeza medida e (b) com a tecnologia aplicada.	39
Fig. 2.5. Esquema da montagem utilizada em fabricação de redes pelo método interferométrico com máscara de fase.	41
Fig. 2.6. Princípio de operação de um sensor baseado em rede de Bragg.	42
Fig. 3.1. Cavidade típica de um laser.	46
Fig. 3.2. Ilustração esquemática dos três processos: (a) absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada.	46
Fig. 4.1. Ilustração esquemática dos estados sólido, cristal líquido e líquido.	52
Fig. 4.2. Ilustração do ângulo entre o director \hat{n} e o eixo maior da molécula do cristal líquido.	53

Fig. 4.3. Variação do parâmetro de ordem S com a temperatura. T_{NI} representa a temperatura de transição para a fase isotrópica [32].	54
Fig. 4.4. Estrutura esquemática na fase nemática dos cristais líquidos termotrópicos.	56
Fig. 4.5. Estrutura esquemática na fase esmética (a) tipo A e (b) tipo C.	57
Fig. 4.6. Estrutura dos cristais líquidos colestéricos. O passo (p) da estrutura periódica é a distância de uma volta completa da hélice.	57
Fig. 5.1. Representação esquemática do alinhamento (a) homeotrópico, (b) homogêneo, e (c) inclinado da fase nemática.	60
Fig. 5.2. Gráfico de n^2 versus α para $\varepsilon_{ } = 3$ e $\varepsilon_{\perp} = 2$.	64
Fig. 5.3. Dependência do parâmetro de ordem S com a temperatura, obtido a partir do potencial de Maier-Saupe.	76
Fig. 5.4. Dependência dos índices de refração extraordinário (n_e) e ordinário (n_o) com a temperatura.	78
Fig. 5.5. Reflexão e transmissão seletiva da luz circularmente polarizada à direita e à esquerda para uma hélice polarizada à direita [39].	81
Fig. 5.6. Geometria das células (a) cilíndrica e (b) plana, usadas em experiência para medição do passo através do método Cano-wedge.	82
Fig. 6.1. Molécula do corante DCM.	94

Fig. 6.2. Imagem da célula de vidro contendo uma mistura de 85% em peso de BL061 e 15% em peso de E7 observada através de um microscópio óptico. Observa-se em (a) a presença de singularidades. Em (b) grande parte das singularidades foram eliminadas após um aquecimento até a fase isotrópica seguindo de um resfriamento lento ($0.01^{\circ}\text{C}/\text{min}$).	96
Fig. 6.3. Foto da célula de vidro contendo a mistura de cristal líquido dopada com corante.	96
Fig. 6.4. Espectros das bandas de reflexão para diferentes concentrações de cristal líquido nemático (a) E7 em BL061 e (b) BL087 em BL088.	97
Fig. 6.5. Gráfico do comprimento de onda da borda de menor energia da banda de reflexão para diferentes concentrações de cristal líquido nemático (■) E7 e (Δ) BL087.	98
Fig. 6.6. Espectro de fluorescência do corante DCM para comprimento de onda de excitação igual a 355nm e 532nm.	99
Fig. 6.7. Espectro de fluorescência do corante DCM à temperatura ambiente para comprimento de onda de excitação igual a 350nm.	100
Fig. 6.8. Banda de reflexão, fluorescência do corante DCM e emissão laser do cristal líquido colestérico composto por 85% em peso de BL061 e 15% em peso de E7 dopado com corante.	101

Fig. 6.9. Espectros da emissão laser do CLC para taxa de repetição de (a) 2Hz, (b) 5Hz e (c) 10Hz da fonte de bombeio operando Q-switched. Resultados obtidos no Instituto de Cristal Líquido da Universidade de Kent.	102
Fig. 6.10. Espectro da emissão laser do CLC quando bombeado com um laser de Nd:YAG Q-switch com taxa de repetição de 2Hz. Medida realizada no Instituto de Cristal Líquido- KSU.	103
Fig. 6.11. Espectros da emissão laser do CLC quando bombeado com um laser de Nd:YAG Q-switch e mode-locking com taxa de repetição de (a) 100Hz e (b) 200Hz. Medidas realizadas no Laboratório de Optoeletrônica do Departamento de Física da PUC-Rio.	105
Fig. 6.12. Espectro da emissão laser do CLC quando bombeado com um laser de Nd:YAG Q-switch com taxa da repetição de 15Hz. Medida realizada no Laboratório de Termociências do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.	106
Fig. 6.13. Sistema fibra-CLC-fibra óptica formando o dispositivo baseado em laser de cristal líquido colestérico.	107
Fig. 6.14. Imagem do sistema utilizado no processo de polimento manual da extremidade da fibra óptica.	108
Fig. 6.15. Imagem da fibra óptica polida manualmente obtida através de um microscópio óptico.	109

Fig. 6.16. Imagem do sistema utilizado para no processo de ficção para que a poliamida adquirisse uma direção preferencial para ancorar o cristal líquido na face da fibra óptica.	110
Fig. 6.17. Montagem experimental utilizada para realização do bombeio do laser CLC e caracterização do dispositivo acoplado a fibra óptica.	111
Fig. 6.18. Imagem do sistema de acoplamento da luz de bombeio na fibra óptica. As imagens inseridas mostram a fibra óptica e o laser de CLC iluminados durante o bombeio e o feixe gerado pela emissão laser do CLC.	112
Fig. 6.19. Banda de reflexão e emissão laser do CLC acoplado a fibra óptica.	113
Fig. 6.20. Resposta do comprimento de onda do laser CLC devido a variação na temperatura para uma mistura composta de 85% em peso de BL061 e 15% em peso de E7.	114
Fig. 6.21. Imagem das linhas de disclinações numa célula com forma de cunha plana preenchida com uma mistura de cristal líquido colestérico BL061 e nemático E7 dopado com 1.5% em peso de corante DCM. Imagem obtida através da utilização de um microscópio óptico.	116
Fig. 6.22. Espessura da célula versus número de linhas de disclinações.	117
Fig. 6.23. Dependência do passo da hélice com a temperatura da mistura de composta por 85% em peso de BL061 e 15% em peso de E7.	118

Fig. 6.24. Gráfico da posição versus número de linhas de disclinações para uma amostra de BL061 e E7 dopada com corante.	119
Fig. 6.25. Dependência do passo da estrutura periódica com a temperatura para uma amostra sem corante.	120
Fig. 6.26. Montagem experimental utilizada para verificar a dependência da emissão laser do CLC com a temperatura para uma amostra dopada com DCM composta por aproximadamente 10% de BL087 e 90% de BL088, em peso.	121
Fig. 6.27. Dependência da temperatura para a emissão laser do CLC de uma amostra composta de BL087 e BL088 dopada com corante inserida numa célula de 23 μ m com alinhamento homogêneo.	123
Fig. 6.28. Dependência da temperatura para a emissão laser do CLC para uma célula de 12 μ m de espessura para a amostra G (Tabela 1).	124
Fig. 6.29. Dependência do passo da hélice com a temperatura para mistura G composta por BL087 e BL088 dopada com corante.	125
Fig. 6.30. Resultado da simulação numérica realizada para a obtenção da dependência da temperatura no comprimento de onda da emissão laser.	127

Fig. 6.31. A linha contínua representa o torque produzido pela superfície de ancoramento (τ_s), enquanto que a linha pontilhada representa o torque volumétrico (τ_v). Os pontos fechados (●) indicam os pontos de estabilidade na competição entre os torques, enquanto o ponto aberto (○) indica ponto de instabilidade devido ao torque superficial.

Lista de Tabelas

Tabela 6.1. Concentração, em peso, de BL088, BL087 e corante DCM nas amostras.	93
Tabela 6.2. Valores do passo da hélice e índices de refração ordinário e extraordinário para uma mistura de 10% em peso de BL087 e 90% em peso de BL088 sem a presença de corante [68].	123

Lista de Abreviaturas

LCLC – Laser de cristal líquido colestérico

MCVD – Deposição química por fase vapor modificada

AN – Abertura numérica

UV – Ultravioleta

cw – Onda contínua

FBG – Rede de Bragg em fibra óptica

CLC – Cristal líquido colestérico

OSA – Analisador de espectro óptico

un.arb. – Unidade arbitrária