



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FLÁVIO BORGES BERTASSO

**Interferômetro holográfico para medidas de vibração e
deformação utilizando um cristal fotorrefrativo como sensor**

Limeira

2021

FLÁVIO BORGES BERTASSO

**Interferômetro holográfico para medidas de vibração e
deformação utilizando um cristal fotorrefrativo como sensor**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Tecnologia da Universidade Estadual de
Campinas como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Tecnologia
na área de Ciências dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan de Oliveira

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO FLÁVIO
BORGES BERTASSO, E ORIENTADO PELO PROF. DR.
IVAN DE OLIVEIRA

Limeira

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

B461i Bertasso, Flávio Borges, 1974-
Interferômetro holográfico para medidas de vibração e deformação
utilizando um cristal fotorrefrativo como sensor / Flávio Borges Bertasso. –
Limeira, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Ivan de Oliveira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Tecnologia.

1. Holografia Interferométrica. 2. Vibração. I. Oliveira, Ivan de, 1972-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Holographic interferometer for vibration and deformation
measurements using a photorefractive crystal as a sensor

Palavras-chave em inglês:

Holographic interferometer

Vibration

Área de concentração: Ciência dos Materiais

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora:

Ivan de Oliveira [Orientador]

Francisco José Arnold

Sandro Pereira da Silva

Data de defesa: 24-06-2021

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-5320-5681>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7430861937491240>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Mestre em Tecnologia na área de concentração de Ciências dos Materiais, a que submeteu o aluno Flávio Borges Bertasso, em 24 de Junho de 2021 na Faculdade de Tecnologia- FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

Prof. Dr. Ivan de Oliveira

Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Francisco José Arnold

FT/Unicamp

Prof. Dr. Sandro Pereira da Silva

Universidade Federal de Lavras

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós Graduação da FT.

"Dedico este trabalho a minha esposa Claudia e meus filhos Pedro e João por todo amor e paciência que me dedicaram."

AGRADECIMENTOS

Nesses anos de Mestrado, de muitos desafios, estudos e esforço, gostaria de agradecer algumas pessoas que foram fundamentais para a conquista desta etapa.

Em primeiro lugar agradeço à minha esposa, Claudia, que sempre me apoiou, incentivou e juntamente com nossos filhos Pedro e João, aguentaram meu mau humor, minha falta de paciência e meus chilikues.

Agradeço à minha mãe Marília e ao meu irmão Fernando, sem eles não teria conquistado tudo o que conquistei.

Agradeço ao Prof. Ivan de Oliveira, que me abriu as portas da pesquisa, sempre me orientando e incentivando.

Agradeço aos colegas que trabalharam em conjunto no laboratório, especialmente ao grande Danilo "Barba", que estava presente em todas as minhas dúvidas, e ao Keiji.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Agradeço à Deus, pois sem essa ajuda divina essa conquista não seria possível.

Por último, embora não seja supersticioso, agradeço ao Gnomo da Boa Esperança, um ser mitológico de grande coração.

Resumo

O objetivo deste projeto de mestrado é construir um interferômetro para medidas de vibração mecânica em 2D utilizando cristais fotorrefrativos como sensor. Além disso, foi desenvolvida uma nova técnica para de deslocamento de fase que vai auxiliar em medidas de deformação. Por fim, é apresentada uma montagem, com pequenas alterações em relação ao interferômetro para medidas de vibração mecânica, para medidas de deformação. Os cristais fotorrefrativos são materiais fotocondutores e eletro-ópticos que apresentam grande potencial para diversas aplicações, tais como: processamento de sinais e imagens, memórias holográficas, dispositivos ópticos, sensores, dentre outras. Neste projeto foi utilizado um cristal da família das selenitas, que são materiais com estrutura $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ ($\text{M} \equiv \text{Si, Ge, Ti}$), nominalmente puros ou dopados. Esses materiais podem ser classificados como rápidos e por isso podem ser utilizados como sensores de vibração e deformação mecânica. Foi utilizado o $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) nominalmente puro como sensor. Para medidas de vibração foi aplicada a técnica de interferometria holográfica em média temporal atuando em conjunto com a técnica auto-estabilizada para o registro holográfico. Para medidas de deformação, o mesmo cristal foi utilizado como sensor, em experimentos abordando a técnica de deslocamento de fase em conjunto com a técnica estabilizada. Para o registro holográfico foi utilizado lasers de baixa potência e de comprimento de onda 638nm e 532nm . Resultados mostram que é possível, mesmo com luz de baixa intensidade, obter mapas de vibração e de deformação de excelente qualidade e que a técnica para deslocamento de fase desenvolvida no laboratório se mostrou eficiente, com precisão de deslocamento da fase em passos sucessivos de $\pi/2$.

Palavras-chaves: Cristais selenitas; Deslocamento de Fase; Vibração; Deformação; Holográfica Interferométrica.

Abstract

The objective of this master's project is to build an interferometer for 2D mechanical vibration measurements using photorefractive crystals as a sensor. In addition, a new phase displacement technique has been developed that will assist in deformation measurements. Finally, an assembly is presented, with small changes in relation to the interferometer for mechanical vibration measurements, for deformation measurements. Photorefractive crystals are photoconductive and electro-optical materials that have great potential for several applications, such as: signal and image processing, holographic memories, optical devices, sensors, among others. In this project, a crystal from the family of silenites was used, which are materials with a structure $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ ($\text{M} \equiv \text{Si, Ge, Ti}$), nominally pure or doped. These materials can be classified as fast and therefore can be used as vibration and mechanical deformation sensors. The nominally pure $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) was used as the sensor. For vibration measurements, the holographic interferometry technique was applied in temporal mean, acting in conjunction with the self-stabilized technique for the holographic recording. For deformation measurements, the same crystal was used as a sensor, in experiments addressing the phase displacement technique in conjunction with the stabilized technique. For the holographic record we use low power lasers with a wavelength of 638nm and 532nm . Results show that it is possible, even with low intensity light, to obtain excellent quality vibration and deformation maps and that the phase shift technique developed in the laboratory proved to be efficient, with phase shift precision in successive steps of $\pi/2$.

Keywords: Selenite crystals; Phase Shift; Vibration; Deformation; Holographic Interferometry.

Lista de Figuras

2.1	Processo de excitação e recombinação de portadores de cargas.	17
2.2	Processo de formação de hologramas.	18
2.3	Representação da amplitude de vibração (a) de uma barra com a respectiva distribuição de intensidade de luz (b).	21
2.4	Esquema de registro holográfico em um cristal fotorrefrativo.	22
3.1	Esquema de um Sistema Estabilizado. DFP : Divisor de Feixe Polarizado; $\lambda/2$ e $\lambda/4$: lâminas de retardo de meia onda e quarto de onda, respectivamente; E : espelhos; DF : Divisor de Feixe; LO : lente objetiva; PZT : espelho apoiado em um piezelétrico; FD : foto-detector; AL : amplificador lock-in; AV : fonte de alta voltagem para o PZT	25
3.2	Esquema de um Sistema Auto-Estabilizado [1].	26
4.1	Montagem experimental utilizada no deslocamento de fase.	30
4.2	Franja de Máxima Intensidade, Mínima Intensidade e Inter-franja, que são deslocadas pela mudança do sinal de erro do sistema de estabilização.	31
4.3	Evolução temporal do primeiro e do segundo harmônico quando sistema de estabilização esta ligado, V^Ω e $V^{2\Omega}$ em unidades arbitrárias a.u..	32
4.4	Evolução temporal do espelho piezelétrico (A) e do padrão de franjas de interferência (B) durante a aquisição de imagens usando o deslocamento de fase igual a $\pi/2$. Em (A) $\Delta V = 40V$ corresponde a tensão aplicada do PZT para produzir o deslocamento do espelho de $\pi/2$. $V^{pattern}$ em unidades arbitrárias a.u..	32
4.5	Padrões de franjas descolados de $\pi/2$. Em (a) deslocamento zero, (b) $\pi/2$, (c) π e (d) $3\pi/2$	33

4.6	Correspondentes mapas de fase após aplicação da técnica do deslocamento de fase. A figura do lado esquerdo corresponde ao mapa de fase quando o sistema de estabilização está ligado e a da direita o mapa correspondendo a condição de não estabilização.	33
4.7	Correspondentes perfis dos mapas de fase após aplicação da técnica do deslocamento de fase. Figuras (B) e (A) são os perfis quando sistema de estabilização esta ligado e desligado respectivamente.	34
5.1	Ilustração da Montagem do Sistema de Medidas de Vibração.	37
5.2	Na figura (a) os feixes transmitido e difratado são paralelos no centro do cristal já na figura (b) os feixes transmitido e difratado são ortogonais na saída do cristal devido a difração anisotrópica.	37
5.3	Membrana pintada com tinta retrorefletora fixa a um alto-falante.	38
5.4	Mapa de vibração.	39
5.5	Mapas de vibração em tempo real utilizando o sensor fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$. As figuras correspondem às seguintes frequências:(a) 600 Hz, (b) 2500 Hz e (c) 5000 Hz.	39
5.6	Mapas de vibração a uma mesma frequência (1kHz), variando sua amplitude de vibração correspondente a 800 mV, 900 mV e 1200 mV.	39
5.7	Perfil em três dimensões do mapa de vibração da membrana vibrando a uma frequência de 1 kHz e com uma amplitude igual a 800 mV.	40
5.8	Amplitude de vibração no máximo da franja (local) em função da tensão aplicada ao gerador de funções. Membrana vibrando a 800 Hz (esquerda) e a 1000 Hz (direita).	40
5.9	Amplitude de vibração no centro da franja escura (local) em função da tensão aplicada ao gerador de funções. Membrana vibrando a 1611 Hz.	41
6.1	Montagem experimental para obtenção de mapas de fase de deformação mecânica. DFP : Divisor de Feixe Polarizado; $\lambda/2$ e $\lambda/4$: lâminas de meia onda e quarto de onda, respetivamente; E : espelhos; DF : Divisor de Feixe; LO : lente objetiva; PZT :espelho apoiado em um piezoelétrico; P ₁ : polarizador; FD : foto-detector; AL : amplificador lock-in; AV : fonte de alta voltagem para o PZT; BTO : Cristal fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$	43

6.2	Deformação das franjas obtidas com o sensor BTO após a deformação da membrana devido a cargas aplicadas em diferentes pontos.	44
6.3	Padrões de intensidade de franjas com deslocamento sucessivo de $\pi/2$. Onde a representa o deslocamento 0 e na sequência b, c e d, representam $\pi/2$, π e $3\pi/2$, respectivamente	45
6.4	Mapa de fase correspondente aos padrões mostrados na Fig.6.3.	45
6.5	Perfil do mapa de fase	46

Conteúdo

1	Introdução	14
2	Teoria	17
2.1	Formação dos Hologramas	17
2.2	Eficiência de Difração	19
2.3	Holografia interferométrica em média temporal	20
2.4	Modulação de Fase	21
3	Sistema de Estabilização	24
3.1	Sistema Estabilizado	24
3.2	Registro holográfico auto-estabilizado	25
4	Deslocamento de fase	27
4.1	Introdução	27
4.2	Técnica do Deslocamento de Fase	28
4.3	Sistema de estabilização aplicado ao deslocamento de fase	29
4.4	Experimento e Resultados	30
4.5	Discussões e Conclusões	31
5	Estudo de Vibração Mecânica em 2D	35
5.1	Introdução	35
5.2	Montagem Experimental	36
5.3	Experimentos e Resultados	36
5.4	Discussões e Conclusões	41
6	Estudo de deformações estáticas	42
6.1	Introdução	42

6.2	Experimento e Resultados	42
6.3	Discussões e Conclusões	45
7	Conclusões gerais do trabalho	47
A	Artigo publicado	49
B	Trabalho publicado em congresso	51
	Bibliografia	52

Capítulo 1

Introdução

A holografia pode ser vista como um método de registro de um padrão de interferência. Tal padrão de interferência se origina pela superposição de duas ondas luminosas. Uma dessas ondas denomina-se de onda objeto e a outra de onda referência. Diferentemente da fotografia que permite apenas ver a distribuição da intensidade da luz, ou seja, a amplitude da onda a holografia permite obter a informação completa da onda, isso quer dizer que a holografia permite a reconstrução completa da onda obtendo informações da amplitude e da fase.

A holografia é uma técnica aplicada amplamente em diferentes áreas da física e da engenharia. Técnicas de holografia interferométrica tem sido utilizadas na metrologia óptica no estudo de vibrações mecânicas, medidas de deslocamento e deformações mecânicas de objetos e em testes não destrutivos [2], além disso a holografia também tem sido utilizada no estudos de materiais fotossensíveis [1].

A holografia interferométrica e suas variantes, tais como, a holografia interferométrica em tempo real e a holografia interferométrica em média temporal, que podem ser utilizadas no estudo de vibrações mecânicas, e a holografia interferométrica de dupla exposição, utilizada para medidas de deformações, possuem importantes aplicações na indústria e também na engenharia [3]. Uma outra técnica utilizada para medidas de deformações é o deslocamento de fase (phase shifting). Essa técnica utiliza quatro padrões de interferência sucessivos e deslocados de $\pi/2$ [4]. Embora a técnica *phase-shifting* seja amplamente utilizada ela apresenta várias dificuldades de implementação. A principal delas é o controle da fase durante o deslocamento de $\pi/2$, pois a montagem experimental é susceptível a perturbações de fase. Com a finalidade de contornar esse problema foi desenvolvida no laboratório de Óptica da Faculdade de Tecnologia a técnica de deslocamento controlado de fase [5].

A análise dos objetos em estudo é feita utilizando o que é denominado como mapas de fase.

O mapa de fase basicamente pode ser obtido através da distribuição de intensidade do padrão de interferência entre os feixes objeto e o feixe difratado pelo holograma. Em algumas técnicas pode-se obter o mapa de fase de forma digital [6, 7]. Embora a holografia digital seja amplamente utilizada, ela torna o processo demorado.

A utilização das técnicas de holografia interferométrica é limitada pelas condições do ambiente que podem causar perturbações de fase durante o processo de gravação, como também pela vibração dos componentes ópticos que compõem a montagem experimental. Para corrigir esses defeitos, aplica-se o uso de técnicas estabilizadas para o controle de fase. As técnicas estabilizadas são bastante utilizadas nos estudos dos materiais fotossensíveis, sobretudo no processo de registro holográfico de redes no volume em cristais fotorrefrativos [8, 9].

Em muitas aplicações, é utilizado um sensor para fazer o registro holográfico das informações do objeto em estudo. Películas fotossensíveis têm sido utilizadas como sensor por diferentes pesquisadores [10, 11, 12]. O uso de películas tem a desvantagem de necessitarem de um tratamento químico após o registro e também de posicionamento da amostra na montagem para que a informação seja lida. Isso torna o processo muito trabalhoso e além disso não ocorre em tempo real. Para reduzir estes fatores, cristais fotorrefrativos podem ser utilizados como sensores de medidas de vibração e deformação [13]. Eles são reversíveis e não necessitam de nenhum tratamento químico após o registro holográfico e também o registro pode ser analisado em tempo real, sem qualquer processamento da imagem.

Cristais fotorrefrativos são materiais eletro-ópticos, isto é, com a aplicação de um campo elétrico sobre o material ocorre uma mudança no índice de refração e são fotocondutores, o que significa que sobre comprimentos de onda específicos é possível gerar portadores de cargas que podem se movimentar pelo volume do material [14]. Ao incidir um padrão de franjas de interferência sobre o cristal fotorrefrativo, excita-se portadores de cargas (elétrons e/ou buracos) de centros fotoativos para a banda de condução e/ou valência. Após inúmeras excitações e recombinações há um acúmulo de cargas de um sinal nas regiões escuras do material e de sinal oposto nas regiões claras, causando assim uma modulação de cargas no volume do material. A modulação de carga cria um campo elétrico, que pelo efeito eletro-óptico, modula o índice de refração do material. Essa modulação no índice de refração causada pela combinação dos efeitos eletro-óptico e da fotocondutividade é um processo reversível, ou seja, sob iluminação uniforme ou por efeitos térmicos ocorre a redistribuição dos portadores de cargas no volume e o material, dessa maneira o cristal pode ser utilizado novamente para novos registros [15].

Este trabalho tem como objetivo principal montar um sistema para medida de vibração

mecânica em 2D onde o sensor seja um cristal fotorrefrativo. Uma das grandes dificuldades é a instabilidade do registro devido a perturbações externas. Duas soluções para esse problema são apresentadas, o sistema estabilizado, que utiliza uma referência externa a montagem para a estabilização da fase e a auto-estabilizada na qual a própria rede que está sendo registrada como sinal de erro é utilizada. Como objetivos específicos espera-se obter uma montagem experimental compacta que permita obter mapas de fase de boa qualidade para objetos deformados estaticamente e/ou vibrando, além de usar técnicas holográficas estabilizadas para a gravação da rede no sensor fotorrefrativo de modo a obter dados que sejam reprodutivos.

Neste trabalho é descrito algumas montagens experimentais otimizadas que utilizam o $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) nominalmente puro, um cristal fotorrefrativo da família das Silenitas. Essas montagens utilizam a holografia interferométrica em média temporal atuando em conjunto com o sistema auto-estabilizado que permitem medidas de vibrações e a técnica do deslocamento de fase, desenvolvida no laboratório, juntamente com o sistema estabilizado para medidas de deformações estáticas em superfícies de materiais. Em ambas as montagens foi utilizado lasers de baixa potência e um cristal fotorrefrativo como sensor em tempo real, resultando em mapas de fase de excelente qualidade.

Este trabalho é apresentando em duas partes. A primeira parte apresenta no **Cap.2** uma revisão teórica sobre a formação de hologramas em cristais fotorrefrativos e no **Cap.3** é mostrada dois sistemas de estabilização para o controle da fase. A segunda parte mostra detalhadamente no **Cap.4** o desenvolvimento e aplicação da técnica do deslocamento de fase e no **Cap.5** as montagens experimentais e resultados para o estudo de vibração mecânica em 2D e no **Cap.6** as montagens experimentais e resultados para o estudo de deformações estáticas. Finalizando, é apresentado no **Cap.7** as conclusões gerais do trabalho.

Capítulo 2

Teoria

2.1 Formação dos Hogramas

O registro de hologramas em materiais fotorrefrativos está baseado na geração e recombinação de portadores de cargas [14]. A incidência de um padrão de luz de comprimento de onda específico, excita os portadores de carga a partir de centros fotoativos para a banda de condução (elétrons) ou para a banda de valência (buracos ou lacunas) [16]. Esses portadores movem-se por difusão e/ou por um campo elétrico externo aplicado e após múltiplas excitações e recombinações, há acúmulo de cargas de um sinal (elétrons) nas regiões escuras do cristal e de sinal contrário nas regiões iluminadas, produzindo um desbalanceamento local de carga elétrica, causando o aparecimento de um campo elétrico que modula o índice de refração do material por efeito eletro-óptico, surgindo um holograma de fase no volume do material. As Figs.2.1 e 2.2 mostram o processo de excitação e recombinação de portadores de cargas e a formação da modulação de índice de refração (holograma) no volume em cristais fotorrefrativos.

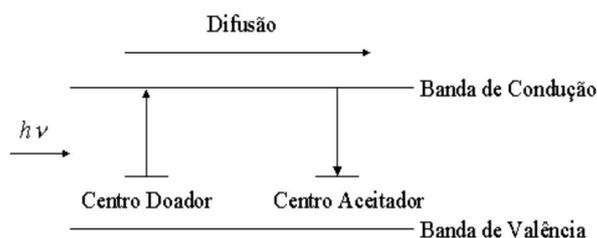


Figura 2.1: Processo de excitação e recombinação de portadores de cargas.

A incidência sobre um cristal fotorrefrativo de um padrão de luz da forma:

$$I = I_0[1 + |m|\cos(Kx)] \quad (2.1)$$

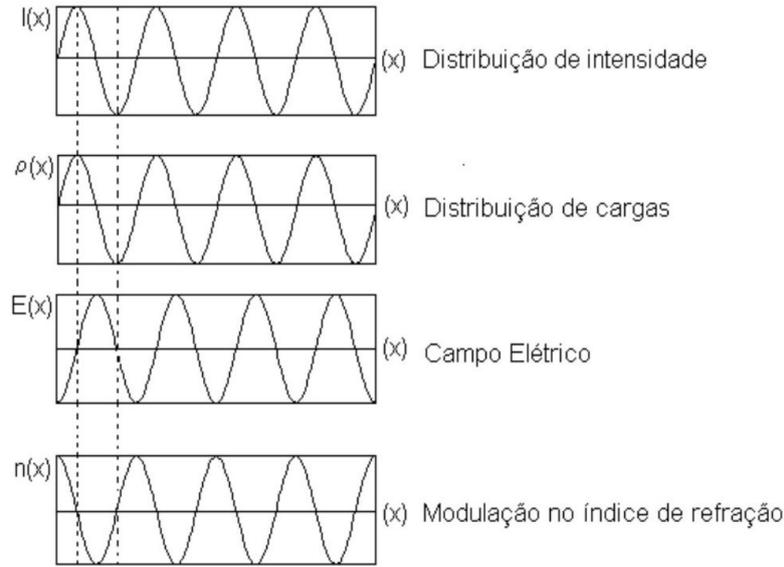


Figura 2.2: Processo de formação de hologramas.

onde m é a visibilidade do padrão franjas e $K = 2\pi/\Lambda$ com Λ o período do padrão luminoso, excita-se portadores de cargas para a banda de condução e/ou valência. A descrição matemática da formação da rede é feita pelo chamado modelo de transporte de bandas [17].

O modelo de transporte de banda pressupõe que os portadores foto-excitados são ejetados de centros doadores para a banda de condução e/ou para a banda de valência. Na banda de condução (ou valência) eles migram para regiões escuras no cristal, por difusão ou por ação de campo elétrico externo, antes de se recombinarem em doadores vazios (ou aceitadores). A separação de carga resulta num campo de carga espacial que modula o índice de refração através do efeito eletro-óptico linear.

Para simplificar, supõe-se que somente os elétrons são foto-excitados, assim, o transporte de carga num material fotorrefrativo fica descrito pelo seguinte conjunto de equações [18]:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{\partial N_D^+}{\partial t} + \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J} \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = qD\nabla n_e + q\mu n_e \vec{E}_0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial N_D^+}{\partial t} = (N_D - N_D^+)(sI + \beta) - \gamma_R N_D^+ n_e \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon \vec{E}_{sc}) = q(N_D^+ - N_A - n_e) \quad (2.5)$$

A equação da continuidade para os elétrons móveis na banda de condução é descrita pela Eq.(2.2), onde n_e representa a densidade de elétrons livres na banda de condução, N_D^+ a densidade de doadores ionizados e \vec{J} a densidade de corrente. O primeiro termo a direita da Eq.(2.2) descreve a taxa de geração e recombinação dos elétrons, e está representado pela Eq.(2.4) e o segundo termo descreve a densidade de corrente. A densidade de corrente, Eq.(2.3), é composta pela corrente de difusão e pela corrente devido a ação de um campo elétrico externo com q , D , μ e E_0 sendo respectivamente, a carga do portador, o coeficiente de difusão, a mobilidade e o campo elétrico externo aplicado.

A Eq.(2.4) é a equação da continuidade para os doadores ionizados, onde N_D^+ é a densidade total de doadores, s seção de choque para a foto-excitação, I_0 a intensidade da luz incidente sobre o cristal, β a taxa com que os elétrons são excitados termicamente e γ_R a constante de recombinação. Os doadores ionizados são imóveis por isso a Eq.(2.4) não contém o termo correspondente a densidade de corrente. A equação de Gauss para o sistema é dada pela Eq.(2.5), onde ϵ_0 , ϵ e N_A são a permeabilidade do vácuo, a constante dielétrica do material e a densidade de centros negativos não fotoativos, respectivamente. O termo N_A aparece para manter a neutralidade elétrica do material no equilíbrio, quando $N_A = N_D^+$. Através da solução do conjunto de Eqs.(2.2-2.5) para um padrão de franjas dado pela Eq.(2.1) pode-se determinar o valor do campo elétrico (E_{sc}) que modula o índice de refração do material. A modulação do índice de refração produzida dessa maneira é dada por:

$$\Delta n = \frac{-n^3 r_{\text{eff}} E_{sc}}{2} \quad (2.6)$$

onde n é o índice de refração médio do material, r_{eff} é o coeficiente eletro-óptico efetivo e E_{sc} é o módulo do campo elétrico que modula o índice de refração.

2.2 Eficiência de Difração

A eficiência de difração (η) é um parâmetro importante no estudo de hologramas em volume em cristais fotorrefrativos. A eficiência de difração mede o quanto de luz incidente é difratada pelo holograma. A eficiência de difração é definida por:

$$\eta = \frac{|S^d|^2}{|S^i|^2} \quad (2.7)$$

onde S^d e S^i são as amplitudes complexas das ondas incidente e difratada pela rede, respectivamente. Utilizando a teoria das ondas acopladas desenvolvidas por Kogelnik [19] é fácil mostrar

que a eficiência de difração de uma rede gravada no volume de um cristal fotorrefrativo, na ausência de auto-difração, é dada por:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi n^3 r_{\text{eff}} E_{sc} d}{2\lambda \cos \theta} \right) \quad (2.8)$$

onde λ é o comprimento de onda, θ é o ângulo entre o feixe de leitura e a normal e d é a espessura do cristal.

2.3 Holografia interferométrica em média temporal

A holografia é uma técnica interessante para medidas de vibrações e deformações, pois por ser um método óptico, é remoto e não invasivo, e por ser holográfico, é também muito sensível [20]. Vários pesquisadores tem utilizado da holografia para diferentes aplicações [21, 22, 23, 24].

Uma técnica muito importante no estudo de vibrações e deformações de objetos é a holografia interferométrica em média temporal (HIMT). Nesta técnica, o registro do holograma do objeto vibrando é feito durante um tempo grande comparado com o período $T_v = 2\pi/\Omega_v$ da vibração do objeto em estudo.

Na técnica da HIMT a análise do objeto é feita através do chamado mapa de fase. O mapa de fase é obtido pela luz difratada pelo holograma gravado. A eficiência de difração, η , do holograma registrado do objeto vibrando com amplitude A_v e frequência Ω_v pode ser escrita como [14]:

$$\eta = \eta_0 J_0^2(4\pi A_v/\lambda) \quad (2.9)$$

onde η_0 é a eficiência de difração do objeto em repouso, J_0 é a função de Bessel de ordem zero e λ o comprimento de onda. A intensidade da luz difratada na imagem reconstruída é então sobreposta sobre um padrão de franjas correspondendo aos máximos e mínimos da função de Bessel. O número e a distribuição das franjas dependem da amplitude A_v , que, geralmente, é função de coordenadas espaciais e da frequência de vibração do objeto sob estudo. Intensidades máximas ocorrem nos *nós* do modo de vibração indicando $A_v = 0$.

Os pontos secundários de máxima intensidade e aqueles nas franjas escuras correspondem a amplitudes de vibração diferentes de zero. Para melhor entendimento considera-se a Fig.2.3 (a) que representa a amplitude de vibração de uma barra e a distribuição da intensidade de luz $I \propto J_0^2(x)$ Fig. 2.3 (b). Analisando a distribuição de intensidade de luz pode-se determinar as amplitudes de vibração em cada ponto.

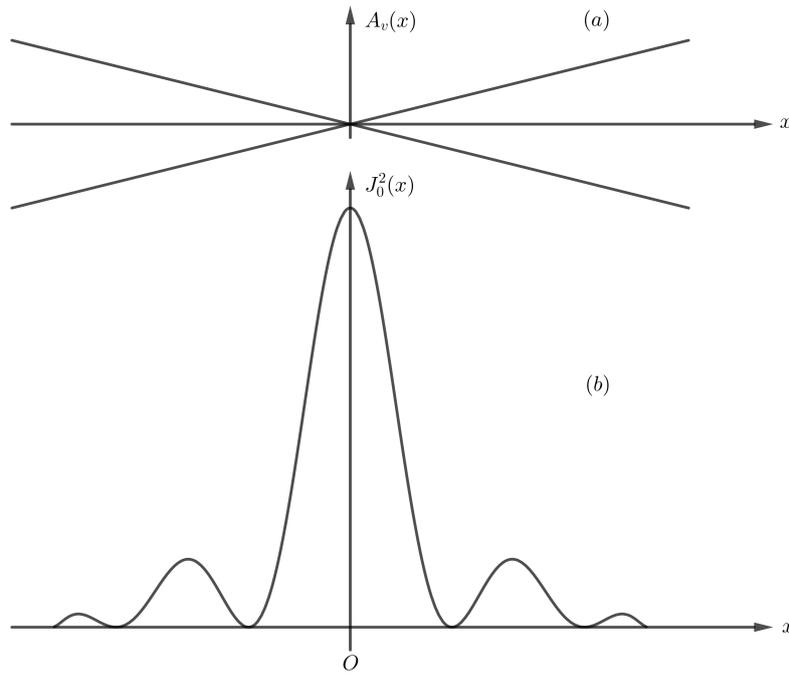


Figura 2.3: Representação da amplitude de vibração (a) de uma barra com a respectiva distribuição de intensidade de luz (b).

2.4 Modulação de Fase

O processo de registro holográfico em geral é um processo suscetível a perturbações de fase. Essas perturbações são causadas pelo ambiente e/ou por modificações, devido a temperatura, dos dispositivos que compõem o interferômetro. Como resultado dessas perturbações o holograma que está sendo gravado fica prejudicado. Uma técnica muito utilizada na correção das perturbações de fase é a técnica do registro holográfico auto-estabilizado [25]. A técnica do registro auto-estabilizado é baseada na técnica da modulação de fase que consiste em modularmos a fase de um dos feixes de escrita com uma frequência Ω e uma amplitude ψ_d . No caso dos cristais fotorrefrativos a frequências Ω dever ser tal que $1/\Omega \gg \tau_{sc}$, onde τ_{sc} é o tempo de resposta da rede que está sendo gravada [26].

A Fig.2.4 mostra o processo de escrita de uma rede em um cristal fotorrefrativo, onde I_R^0 e I_S^0 são os feixes incidentes, que geram o padrão de interferência. Já I_R^t , I_R^d , I_S^t e I_S^d são as intensidades dos feixes transmitido e difratado nas direções R e S . Ao longo da direção S a intensidade total, atrás da amostra, pode ser escrita da seguinte forma:

$$I_S = I_S^0(1 - \eta) + I_R^0\eta + 2\sqrt{\eta(1 - \eta)}\sqrt{I_S^0 I_R^0} \cos \varphi \quad (2.10)$$

onde η é eficiência e difração, φ a diferença de fase entre os feixes difratado e transmitido.

Na parte direita da Eq.2.10 o primeiro termo representa a parte transmitida na direção S , o segundo termo representa a luz difratada e o último termo representa a interferência da luz entre as direções S e R .

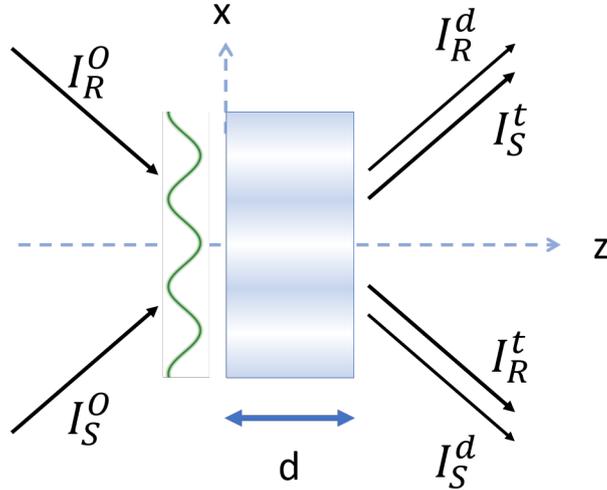


Figura 2.4: Esquema de registro holográfico em um cristal fotorrefrativo.

Considera-se agora que a fase de um dos feixes de escrita está sendo modulada com frequência Ω e amplitude ψ_d da seguinte forma,

$$\varphi = \varphi_0 + \psi_d \sin \Omega t \quad (2.11)$$

com φ_0 sendo a fase na ausência de modulação. Substituindo a Eq.(2.11) na Eq.(2.10) tem-se que a intensidade ao longo da direção S pode ser escrita como,

$$I_S = I_S^0(1 - \eta) + I_R^0\eta + 2\sqrt{\eta(1 - \eta)}\sqrt{I_S^0 I_R^0} \cos(\varphi_0 + \psi_d \sin \Omega t) \quad (2.12)$$

sendo I_S^0 e I_R^0 as intensidades dos feixes incidentes. Expandindo o termo $\cos(\varphi_0 + \psi_d \sin \Omega t)$ e substituindo na Eq.(2.12) obtém-se,

$$I_S = I_S^{dc} + I_S^\Omega + I_S^{2\Omega} + I_S^{3\Omega} + \dots \quad (2.13)$$

onde I_S^{dc} é um termo dc e os outros termos são harmônicos da frequência Ω cujas amplitudes do primeiro e do segundo harmônico, que são os mais intensos, são dadas por,

$$I_S^\Omega = -4J_1(\psi_d)\sqrt{\eta(1 - \eta)}\sqrt{I_S^0 I_R^0} \sin \varphi_0 \quad (2.14)$$

$$I_S^{2\Omega} = 4J_2(\psi_d)\sqrt{\eta(1 - \eta)}\sqrt{I_S^0 I_R^0} \cos \varphi_0 \quad (2.15)$$

onde $J_1(\psi_d)$ e $J_2(\psi_d)$ são as funções de Bessel de primeira e de segunda ordem respectivamente.

Na ausência de auto-difração a fase φ_0 está relacionada a fase holográfica ϕ (diferença de fase entre o padrão e a rede) da seguinte forma,

$$\varphi_0 = \phi \pm \frac{\pi}{2} \quad (2.16)$$

A técnica da modulação de fase tem sido amplamente utilizada em holográfica interferométrica para o controle de fase [27, 28]. No processo de registro holográfico em cristais fotorrefrativos, como as Silenitas ($\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ com $M \equiv \text{Si, Ge, Ti}$), a técnica da modulação de fase é utilizada em um sistema opto-eletrônico para correção das perturbações de fase durante o processo de gravação da rede. Isso é possível pois, na ausência de campo elétrico externo, a fase ϕ é igual a $\pm\pi/2$ [29] e uma consequência direta desse fato é que no equilíbrio tem-se $I_S^\Omega = 0$ e então pode-se utilizar I_S^Ω como sinal de erro para operar o sistema de estabilização.

Capítulo 3

Sistema de Estabilização

A ampla utilização das técnicas de interferometria holográfica fica limitada por problemas relacionados as perturbações de fase causadas pelo ambiente durante o processo de gravação. O uso de técnicas estabilizadas tem sido amplamente utilizadas para o controle de fase no estudo dos materiais fotosensíveis, sobretudo no processo de registro holográfico de redes no volume em cristais fotorrefrativos [14]. Neste capítulo será descrito duas técnicas de controle de fase baseadas na técnica da modulação de fase apresentada no Cap.2. Uma delas que é denominada de técnica estabilizada faz uso de um sinal externo (padrão de franjas) para alimentar o sistema opto eletrônico de controle de fase. Já a outra técnica que é denominada de auto-estabilizada usa a própria rede que esta sendo gravada no volume como sinal de erro para operar o sistema de controle de fase.

3.1 Sistema Estabilizado

O uso de técnicas de interferometria holográfica é sensível as perturbações causadas sobretudo pelo ambiente. Para minimizar essas perturbações pode-se utilizar um sistema opto-eletrônico de correção, fig.3.1. Utilizando a técnica da modulação de fase modula-se a fase de um dos feixes de escrita do holograma com uma frequência Ω e uma amplitude ψ_d , como descrito na Sec.2.4. Como resultado dessa modulação termos harmônicos em Ω surgem. Utilizando amplificadores *lock-in* pode-se sintonizar o primeiro ou o segundo harmônico (que são os mais intensos) para alimentar um espelho piezolétrico que se movimenta de modo a corrigir as perturbações no padrão de franjas. É importante perceber que nesse tipo sistema de estabilização, que foi denominada de sistema estabilizado, o padrão simplesmente fica estático durante o processo de gravação, e dessa forma não mantém qualquer relação de fase com aquilo que está sendo gravado.

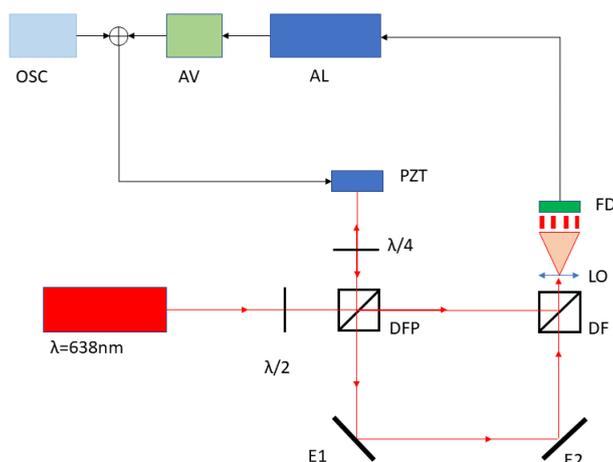


Figura 3.1: Esquema de um Sistema Estabilizado. **DFP**: Divisor de Feixe Polarizado; $\lambda/2$ e $\lambda/4$: lâminas de retardo de meia onda e quarto de onda, respectivamente; **E**: espelhos; **DF**: Divisor de Feixe; **LO**: lente objetiva; **PZT**: espelho apoiado em um piezoeletrico; **FD**: foto-detector; **AL**: amplificador lock-in; **AV**: fonte de alta tensão para o PZT

Neste trabalho foi utilizado o sistema estabilizado associado a técnica do deslocamento de fase. Será mostrado mais adiante que mapas de fase obtidos utilizando o sistema de estabilidade são reprodutíveis, confiáveis e de excelente qualidade quando comparados com as técnicas não estabilizadas.

3.2 Registro holográfico auto-estabilizado

O registro holográfico em cristais fotorrefrativos está sujeito às perturbações provocadas pelo ambiente e/ou pelas condições experimentais [30]. Em materiais como $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, o registro holográfico pode demorar de minutos a horas dependendo do estado de oxidação da amostra, e dessa forma é necessário que o registro do holograma seja isento de qualquer perturbação de modo que o processo de gravação seja eficiente [31]. Para isso deve-se gravar o holograma utilizando a técnica do registro auto-estabilizado[2]. Essa técnica além de minimizar os efeitos das perturbações, também possibilita o registro de uma rede altamente eficiente. Diferentemente do sistema estabilizado que utiliza uma referência externa para fixar o padrão de franjas na face de entrada do material, o sistema auto-estabilizado consiste em utilizar o próprio holograma que está sendo gravado como referência para estabilizar o padrão de franjas.

A Fig.3.2 mostra uma representação do sistema auto-estabilizado. Na figura **BS** é um divisor de feixes, **M** um espelho, **C** é o cristal fotorrefrativo, **D** é o fotodetector que transforma o sinal

I_S em sinal elétrico, **LA** são amplificadores lock-in sintonizados em Ω e 2Ω respectivamente, **HV** é uma fonte de alta tensão para o espelho piezoelétrico (**PZT**) atuando como modulador de fase e **OSC** o oscilador na frequência Ω . Nesse sistema a modulação da fase de um dos feixes de gravação é produzida pelo espelho piezoelétrico (**PZT**) colocado em um dos braços do interferômetro. O primeiro (I^Ω) e o segundo ($I^{2\Omega}$) harmônico devido a essa modulação são sintonizados por amplificadores **lock-in** que produzem um sinal de correção que injetado na montagem experimental a fim de corrigir as perturbações.

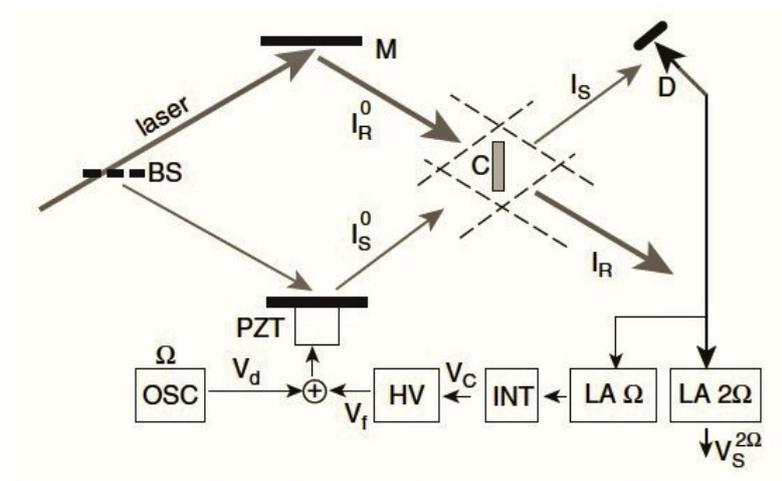


Figura 3.2: Esquema de um Sistema Auto-Estabilizado [1].

O sistema auto-estabilizado possui algumas vantagens com relação ao sistema estabilizado, como por exemplo a gravação de uma rede altamente eficiente. No sistema estabilizado não há relação do sinal de erro com o holograma que esta sendo gravado. Já no sistema auto-estabilizado há uma relação de fase entre o holograma que esta sendo gravado e o sinal de correção. E isso é uma vantagem importante pois permite que se utilize um dos harmônicos como sinal de erro para alimentar o sistema de correção e obter informações do holograma gravado analisando o outro harmônico.

Para um cristal fotorrefrativo da família das Silenitas, como o $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO), a fase φ_0 é $\pi/2$ sem campo aplicado. Nessa situação pode-se usar o primeiro harmônico como sinal de erro ($I_S^\Omega=0$) e o segundo harmônico para medir a eficiência de difração ($I_S^{2\Omega} \propto \sqrt{\eta(1-\eta)}$).

Capítulo 4

Deslocamento de fase

4.1 Introdução

A interferometria óptica abrange todo o campo e técnicas de medição sem contato, com uma grande variedade de aplicações [32]. Além disso, elas são rápidas e permitem medir a variação da fase óptica da ordem do comprimento de onda [33]. Comprimentos de onda curtos tem o interesse que as variações de onda muito pequenas podem ser medidas, mas, por sua vez, a estabilidade da montagem precisa ser de tal forma que variações de fase óptica indesejadas devido a perturbações ambientais devem ser muito menores que o comprimento de onda. Algumas técnicas de holografia interferométrica são muito interessantes e podem ser usadas em muitas aplicações de metrologia óptica e testes não destrutivos, como por exemplo em medidas de vibrações e deformações [7, 34, 35, 36]. Porém, as configurações holográficas interferométricas são altamente sensíveis a diferentes tipos de perturbações, isto implica uma dificuldade em obter dados reproduzíveis e confiáveis, principalmente em experimentos para medir diferenças de fase. Uma maneira de reduzir a instabilidade em uma configuração experimental holográfica, causada por perturbações ambientais, é usar altíssimos comprimentos de onda, mas ao custo da sensibilidade da medida [37, 38, 39]. Outra maneira é usar um processo de estabilização ativa, como mostrado na seção 3.1. Vários trabalhos tem usado esse processo com o objetivo de reduzir a instabilidade na montagem experimental [40, 41, 42, 43, 44, 45, 31, 46].

Variações de fase devido a variações externas são medidas e usadas como um sinal de erro, onde atua um espelho na trajetória de referência para cancelar o efeito das perturbações. Em aplicações que usam interferometria holográfica, os parâmetros de interesse podem ser extraídos de medições de diferença de fase entre os feixes objeto e referência. Para conseguir isto, é requerida técnicas de quantificação de fases, onde a mais conhecida e aplicada amplamente é a técnica

do deslocamento de fase temporal [47, 48, 49, 50, 51, 4], que geralmente é implementada pela captura de consecutivos interferogramas com um deslocamento de fase específico e bem calibrado entre eles. Do ponto de vista experimental, os passos de fase são feitos movendo um espelho montado em um transdutor piezelétrico colocado geralmente no feixe de referência. Alguns trabalhos mostram uma montagem estabilizada ativa com possibilidade de deslocamento de fase adicional, que era capaz de realizar o deslocamento de fase [43, 44]. No entanto, ele não usava um amplificador *lock-in* rápido e sim um sistema de análise de fase de quadratura que detectava variação de fase em um interferômetro Mach-Zehnder adicionado ao interferômetro holográfico primário. Esta montagem específica tem aplicação limitada ao teste de um espelho esférico em ambientes perturbados, mas com perturbações externas em frequências não superiores a algumas centenas de hertz.

Apresenta-se uma técnica de modulação de fase para operar um loop de feedback negativo optoeletrônico para produzir um padrão de franjas para neutralizar as perturbações externas em frequências mais altas ($> 1kHz$). Além disso, mostra-se que é possível produzir deslocamentos de fase preciso em $\pi/2$ através da aplicação da estabilização ativa.

4.2 Técnica do Deslocamento de Fase

A distribuição de fase $\phi(x, y)$ de uma padrão de franjas representado por,

$$I(x, y) = I_0[1 + m(x, y) \cos \phi(x, y)] \quad (4.1)$$

onde I_0 é a intensidade média, $m(x, y)$ a visibilidade do padrão de franjas e $\phi(x, y)$ a fase. A fase pode ser determinada deslocando o padrão de intensidade de zero a $3\pi/2$, em intervalos sucessivos de $\pi/2$. Substituindo na Eq.(4.1) $\phi(x, y)$ por $\phi(x, y) + i\pi/2$ com $i = 0, 1, 2$ e 3 conseguimos os seguintes valores para a intensidade do padrão de interferência,

$$I_1 = I_0[1 + m(x, y) \cos \phi(x, y)] \quad (4.2)$$

$$I_2 = I_0[1 - m(x, y) \sin \phi(x, y)] \quad (4.3)$$

$$I_3 = I_0[1 - m(x, y) \cos \phi(x, y)] \quad (4.4)$$

$$I_4 = I_0[1 + m(x, y) \sin \phi(x, y)] \quad (4.5)$$

A partir das equações descritas acima após algumas manipulações matemáticas pode-se escrever que a fase $\phi(x, y)$ é dada por:

$$\phi = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (4.6)$$

A fase é um parâmetro importante no estudo das deformações em testes não destrutivos quando se utiliza técnicas de interferometria holográfica [52, 7]. A fase $\phi(x, y)$ determina os chamados mapa de fase e esse mapa fornece informações sobre a amplitude das deformações assim como das regiões deformadas do objeto.

4.3 Sistema de estabilização aplicado ao deslocamento de fase

O sistema de estabilização de um padrão de franjas interferência é baseado na modulação da fase de um dos feixes de interferência com alta frequência (Ω) e pequena amplitude. O padrão de intensidade nessas condições pode ser escrito da seguinte forma,

$$I(x, y) = I_0[1 + m(x, y) \cos[\phi(x, y) + a \sin(\Omega t)]] \quad (4.7)$$

com a amplitude $a \ll 1$ e I_0 , $m(x, y)$ e $\phi(x, y)$ sendo a intensidade média, a visibilidade do padrão de franjas e a respectiva fase no plano (x, y) de projeção. As amplitudes do primeiro e do segundo harmônico na frequência Ω podem ser escritas como sendo,

$$I^\Omega(x, y) = -2m(x, y)I_0J_1(a) \sin \phi(x, y) \quad (4.8)$$

$$I^{2\Omega}(x, y) = 2m(x, y)I_0J_2(a) \cos \phi(x, y) \quad (4.9)$$

com $J_1()$ and $J_2()$ são as funções de Bessel de primeira e de segunda ordem respectivamente. É importante notar que quando $I^\Omega = 0$ tem-se $\phi = \pi N$ com $N = 0, 1, 2, 3, \dots$ que substituindo na Eq.(4.7) terá como resultado os máximos e mínimos da intensidade do padrão de franjas de interferência. Já quando $I^{2\Omega} = 0$ tem-se $\phi = (2N + 1)\pi/2$ que significa regiões entre o máximo e mínimo da intensidade do padrão de interferência, ou seja, uma inter-franja. Portanto utilizando o sinal de primeiro harmônico (I^Ω) como um sinal de erro, para correção das perturbações, assim, mantém-se o padrão de franjas de interferência fixo no máximo ou no mínimo ($I^\Omega = 0$) dependendo do sinal $I^{2\Omega} < 0$ ou $I^{2\Omega} > 0$ e dessa forma manter o sistema em equilíbrio.

É importante notar que pode-se mudar do máximo para o mínimo do padrão de intensidade das franjas apenas mudando o sinal no amplificador *lock-in* para mudar o sinal do $I^{2\Omega}$. Similarmente usando o sinal $I^{2\Omega}$ como sinal de erro mantém-se fixo a região entre o máximo e mínimo de intensidade sobre o fotodetector.

Torna-se possível deslocar, de um lado para o outro a partir do máximo, mudando o sinal do primeiro harmônico. Torna-se óbvio que estabilizar o padrão das franjas no fotodetector

também significa que o padrão das franjas na câmera CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) também será estabilizado, pois a configuração é a mesma.

4.4 Experimento e Resultados

Com o objetivo de aplicar a técnica do deslocamento de fase aliado ao sistema de estabilização uma montagem experimental foi construída e na Fig.4.1 representa o esquema. Na Fig.4.1 o laser de comprimento de onda 638 nm é dividido em dois feixes com intensidades I_1 e I_2 com o auxílio do cubo (**PBS**) e da lâmina de meia onda ($\lambda/2$).

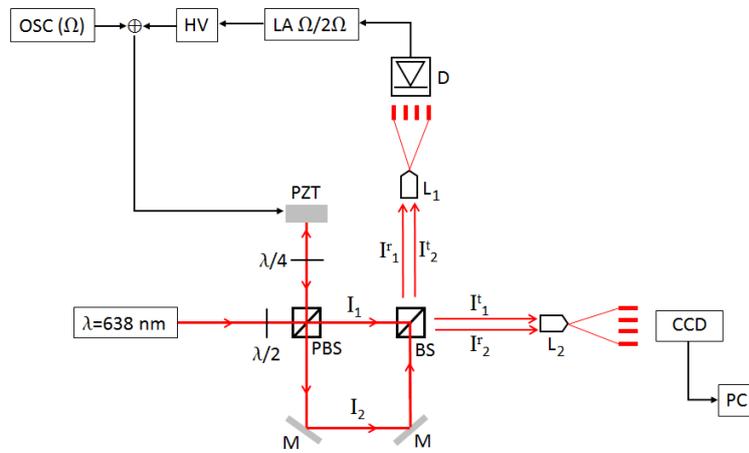


Figura 4.1: Montagem experimental utilizada no deslocamento de fase.

O feixe I_2 é refletido pelo **PBS** e pelo **PZT** que oscila com uma frequência Ω . O outro feixe I_1 é dividido em dois pelo cubo divisor de feixes (**BS**). Parte desse feixe (I_1^t) interfere com o feixe I_2^t sobre uma lente objetiva. O padrão obtido é projetado sobre uma câmera **CCD**. A outra parte do feixe I_1 (I_1^t) interfere com o feixe I_2^t sobre outra lente objetiva (**L₁**) e o padrão expandido é projetado sobre o fotodetector **D**. O padrão projetado no fotodetector é utilizado como sinal de erro para alimentar o sistema de estabilização.

Operando o sistema de estabilização utilizando o sinal de primeiro harmônico $V^\Omega(x, y)$ como sinal de erro mantém a franja clara ou a escura fixa no fotodetector. Já utilizando o sinal de segundo harmônico $V^{2\Omega}(x, y)$ como sinal de correção faz com que a inter-franja permaneça fixa no fotodetector, Fig.4.2. Para deslocar o padrão de franjas de $\pi/2$ troca-se o sinal do erro, de primeiro harmônico para segundo harmônico ou vice-versa, que alimenta o sistema de estabilização. A Fig.4.3 mostra a mudança dos sinais de erro durante o movimento do espelho piezolétrico. Pela figura pode-se notar que quando o primeiro harmônico $V^\Omega(x, y)$ é zero o segundo harmônico é máximo indicando que o PZT deslocou o padrão de franjas exatamente

de $\pi/2$. O mesmo acontecendo quando utiliza-se o sinal de segundo harmônico $V^{2\Omega}(x, y)$ como sinal de erro, como mostrado na Fig.4.4.

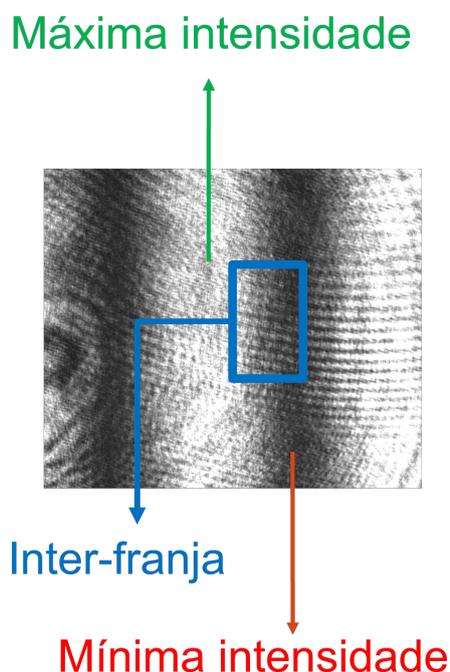


Figura 4.2: Franja de Máxima Intensidade, Mínima Intensidade e Inter-franja, que são deslocadas pela mudança do sinal de erro do sistema de estabilização.

Os padrões de franjas deslocados de $\pi/2$ projetados sobre a câmara **CCD**, quando o sistema de estabilização está ligado são mostrados na Fig.4.5.

Utilizando as imagens mostradas na Fig.4.5 determina-se o mapa de fase correspondente que é mostrado na Fig.4.6 (esquerda) já a direita é mostrado o mapa de fase obtido quando o sistema de estabilização não está ligado.

4.5 Discussões e Conclusões

Nesta parte do trabalho mostra-se que o uso da técnica estabilizada permite aumentar a qualidade e a reprodutibilidade dos mapas de fase determinados pela técnica do deslocamento sucessivo de $\pi/2$ do padrão de interferência. Isso fica claro quando analisa-se a Fig.4.7 onde é mostrado o perfil dos mapas de fase estabilizado e não estabilizado.

Embora o sentido do deslocamento de $\pi/2$ possa ser controlado de modo a termos certeza do deslocamento monotônico do PZT isso não é necessário pois o sistema permite identificarmos os sinais de máximo e mínimo do padrão de franjas. A técnica desenvolvida nesse trabalho pode ser

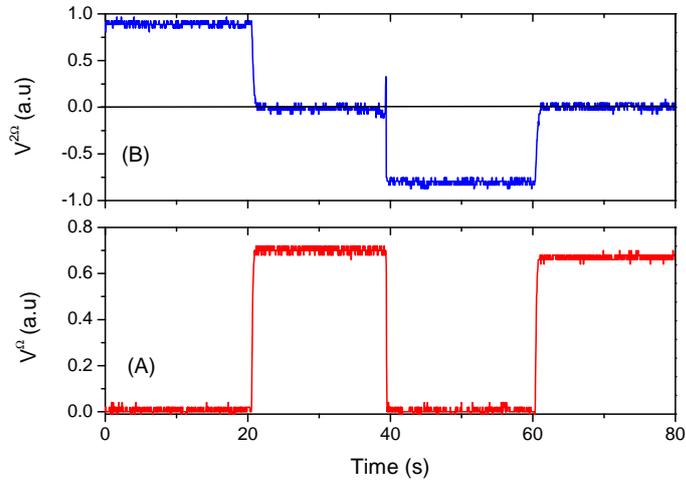


Figura 4.3: Evolução temporal do primeiro e do segundo harmônico quando sistema de estabilização esta ligado, V^Ω e $V^{2\Omega}$ em unidades arbitrárias a.u..

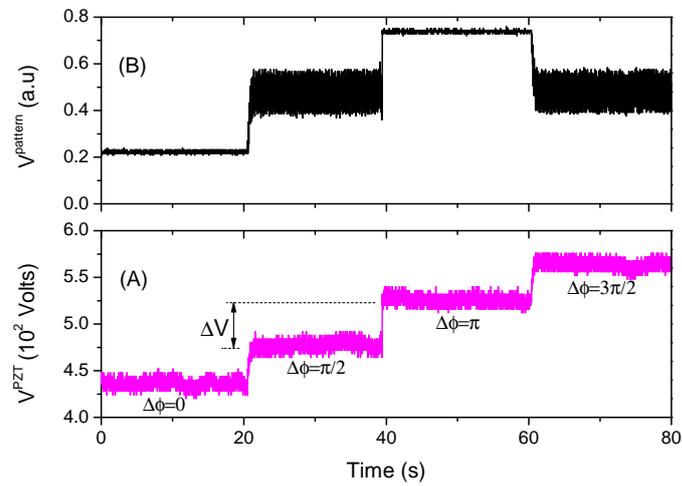


Figura 4.4: Evolução temporal do espelho piezolétrico (A) e do padrão de franjas de interferência (B) durante a aquisição de imagens usando o deslocamento de fase igual a $\pi/2$. Em (A) $\Delta V = 40V$ corresponde a tensão aplicada do PZT para produzir o deslocamento do espelho de $\pi/2$. $V^{pattern}$ em unidades arbitrárias a.u..

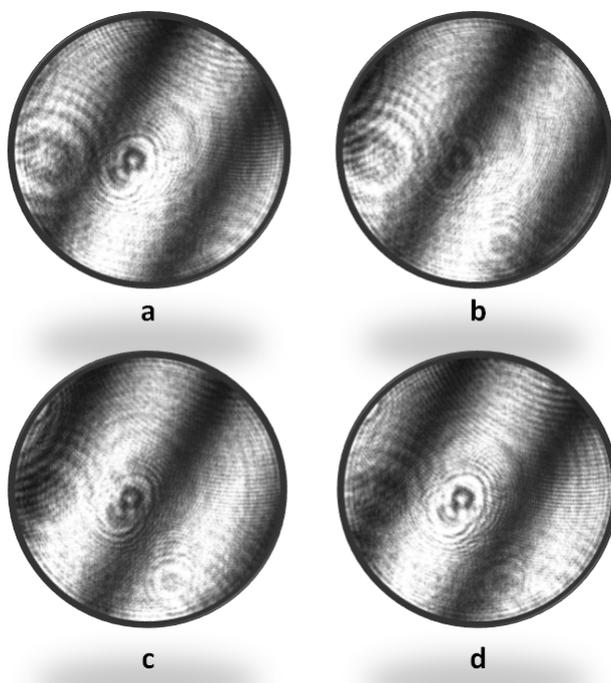


Figura 4.5: Padrões de franjas descolados de $\pi/2$. Em (a) deslocamento zero, (b) $\pi/2$, (c) π e (d) $3\pi/2$.

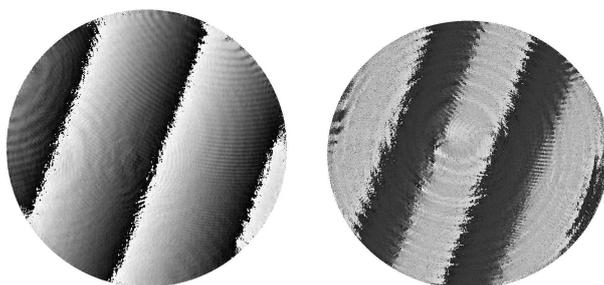


Figura 4.6: Correspondentes mapas de fase após aplicação da técnica do deslocamento de fase. A figura do lado esquerdo corresponde ao mapa de fase quando o sistema de estabilização está ligado e a da direita o mapa correspondendo a condição de não estabilização.

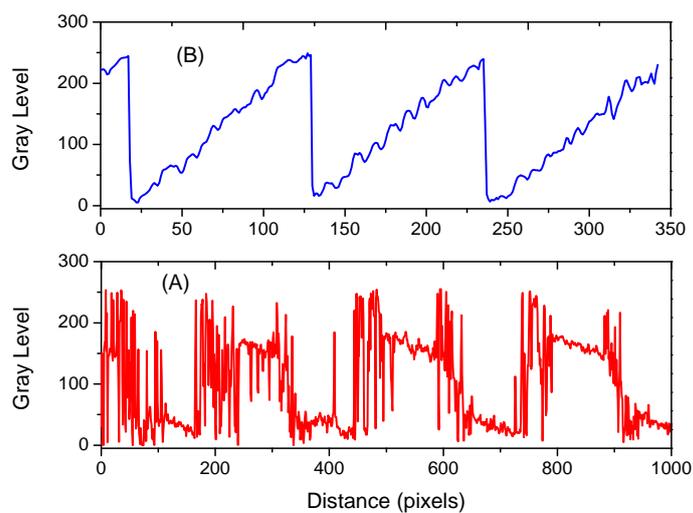


Figura 4.7: Correspondentes perfis dos mapas de fase após aplicação da técnica do deslocamento de fase. Figuras (B) e (A) são os perfis quando sistema de estabilização esta ligado e desligado respectivamente.

facilmente adaptada para um sistema de obtenção de mapas mais complexo que o apresentado.

Capítulo 5

Estudo de Vibração Mecânica em 2D

5.1 Introdução

Holografia Interferométrica (HI) é uma técnica muito interessante que permite estudar deformações e/ou vibrações de objetos através do estudo do padrão de franjas gerado pela interferência de dois feixes de luz laser, o feixe referência e o feixe objeto. A HI tem se mostrado uma técnica muito importante para a engenharia e também para a indústria uma vez que várias outras técnicas, tais como holografia interferométrica em tempo real, holografia interferométrica por dupla exposição e holografia interferométrica em média temporal (HIMT) tem sido desenvolvidas tendo como princípio a HI [32, 53]. A HIMT já é aplicada no estudo de vibrações em produtos industriais como freios automotivos [54].

Nas aplicações da HI para o estudo de vibrações utiliza-se um sensor como responsável em coletar as informações do objeto em estudo. Muitos pesquisadores [11, 12, 10] tem utilizado a HI e polímeros fotossensíveis como sensor, entretanto, a utilização desses materiais torna o processo bastante trabalhoso uma vez que o processo não ocorre em tempo real, ou seja, para se obter as informações do objeto vibrando é preciso que o filme, após o registro, passe por um processo químico para a revelação da imagem. Após o processo de revelação o filme deve ser posicionado na montagem para que se possa fazer a análise da imagem, todavia o reposicionamento nunca é naquele lugar em que ocorreu o registro e isso faz que a imagem não seja bem definida. Uma técnica também muito utilizada no estudo de vibrações é a ESPI (Electro-Spackle Interferometry) [55, 56, 57]. Apesar de a técnica ESPI apresentar bons resultados experimentais [58, 59] essa técnica possui várias desvantagens. Uma grande desvantagem está no fato de o processo de registro por *spackle* ser muito susceptível a perturbações do ambiente e também a qualidade da luz utilizada no processo. Outra desvantagem da ESPI está relacionada ao tratamento digital

que a imagem deve receber após o registro.

Para reduzir os problemas com os filmes poliméricos fotossensíveis para a medida de vibração utiliza-se nesse trabalho a holografia interferométrica e os cristais fotorrefrativos, em especial o cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) como sensor de vibrações e a técnica do registro auto-estabilizado. Muitos pesquisadores já tem utilizado os cristais fotorrefrativos para diversas aplicações e em diversas áreas [60, 61, 62, 63, 64, 52]. A grande vantagem dos cristais fotorrefrativos esta no fato de que esses materiais são reversíveis e não necessitam de qualquer processo químico para a revelação da imagem. Outra grande vantagem esta no fato que a imagem pode ser analisada em tempo real sem qualquer processamento digital da imagem.

A seguir é descrito a montagem experimental dos experimentos realizados, assim como os resultados obtidos no estudo da vibração mecânica em 2D utilizando o cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ como sensor.

5.2 Montagem Experimental

A montagem experimental para medidas de vibração mecânica é mostrada na fig.5.1. Um feixe de luz laser de comprimento de onda 532 nm é dividido pelo divisor de feixes polarizante (DFP ou PBS) em dois feixes: o feixe de referência e o feixe objeto. Com o objetivo de escolher polarizações iguais para os dois feixes utiliza-se uma lâmina de meia onda $\lambda/2$, localizada a frente do **DFP** além disso, as lâminas têm como função controlar a razão de intensidade entre ambos os feixes. A lâmina de quarto de onda, $\lambda/4$, localizada entre o piezelétrico, **PZT** e **DFP** produz uma rotação de 45 graus no plano de polarização da luz a fim de que ambos os feixes tenham a mesma polarização após o cubo (**DFP**). A montagem é composta ainda por sistema de aquisição de dados (imagens) **CCD** e pelo sistema de estabilização descrito anteriormente.

5.3 Experimentos e Resultados

Utilizando a montagem descrita foi colocado o cristal $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) nominalmente puro como o sensor de vibrações mecânicas. A polarização dos feixes de escrita foram escolhidas, com auxílio das duas lâminas de meia onda situadas nos feixe de referência e objeto, sendo paralelas ao eixo [001] do cristal (BTO) de modo que os feixes transmitido e difratado sejam polarizados ortogonalmente na saída do cristal. A Fig.5.2 mostra essa característica que é chamada de difração anisotrópica que o cristal BTO possui [65].

Nosso objeto de estudo é uma fina membrana metálica de área superficial aproximadamente

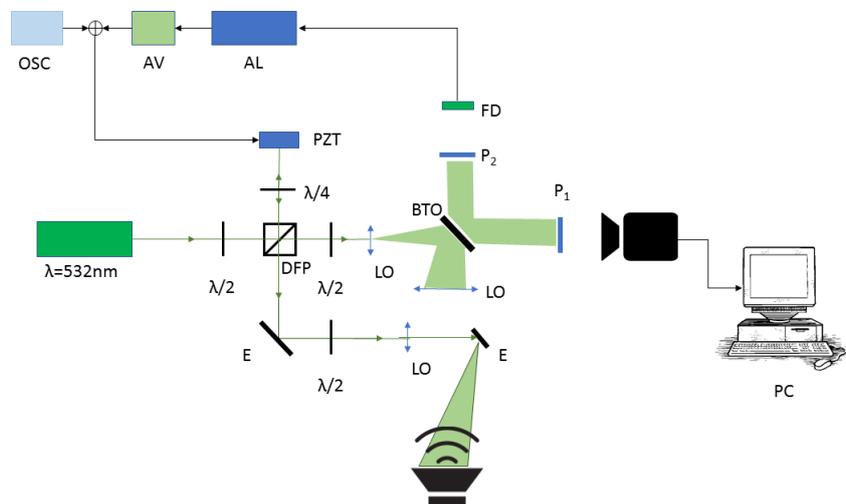


Figura 5.1: Ilustração da Montagem do Sistema de Medidas de Vibração.

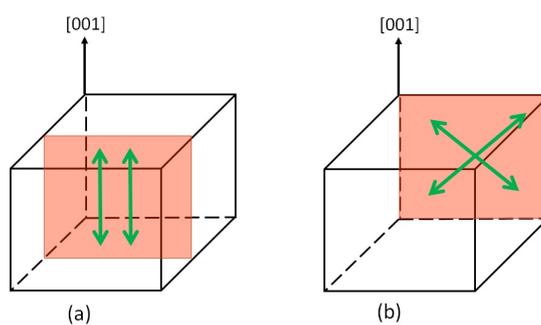


Figura 5.2: Na figura (a) os feixes transmitido e difratado são paralelos no centro do cristal já na figura (b) os feixes transmitido e difratado são ortogonais na saída do cristal devido a difração anisotrópica.

de 50 cm^2 e de espessura 0.3 mm , conectada a um alto-falante e pintada com tinta retro-refletora Fig.5.3. Com auxílio de uma lente expandiu-se o feixe objeto a fim de iluminar toda a superfície da membrana. Também com auxílio de uma lente convergente foi incidido a luz retro refletida pelo objeto sobre o cristal. O movimento de vibração da membrana é devido ao movimento do alto-falante conectado a um gerador de funções. Com um simples polarizador, colocado na saída do cristal, mistura-se os feixes transmitido e difratado. Essa mistura das ondas tem como resultado um padrão de franjas que é denominado mapa de vibração, como o mostrado na Fig.5.4. O mapa de vibração é gerado ao mesmo tempo em que é captado por uma câmara CCD que é conectada diretamente por um computador. Isso permite avaliar o mapa de vibração em “tempo real”. Utilizando uma faixa de frequência ampla e com diferentes amplitudes de vibração foi obtido vários mapas de vibração que são mostrados na Fig.5.5.



Figura 5.3: Membrana pintada com tinta retrorefletora fixa a um alto-falante.

Uma característica importante que pode ser observada na fig. 5.5 é a relação entre os modos de vibração (mapa de vibração) com a frequência de vibração. Entretanto pode-se fixar a frequência de vibração e variar a amplitude de vibração. A Fig.5.6 mostra mapas de vibração para uma frequência fixa, 1 kHz , porém com diferentes amplitudes de vibração. Nota-se que aumentado a amplitude de vibração (dada pelo gerador de sinais) o número de franjas (nesse caso anéis) também aumenta.

Na Fig.5.6 percebe-se que além do aumento do números de franjas com a amplitude de vibração existe também uma diminuição da intensidade das franjas para anéis mais afastados

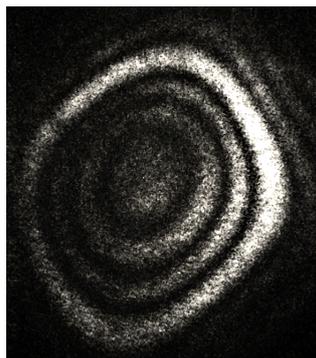


Figura 5.4: Mapa de vibração.

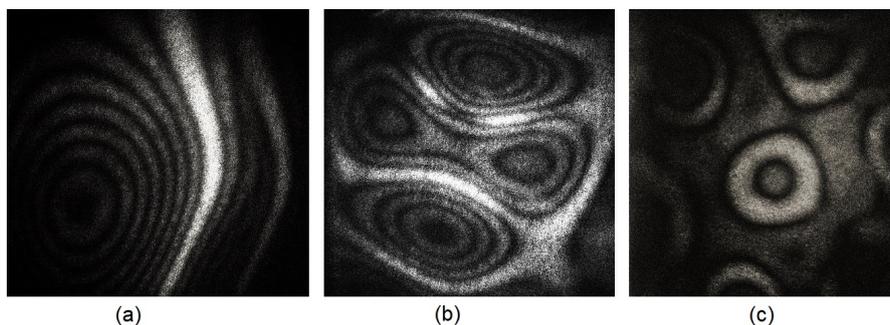


Figura 5.5: Mapas de vibração em tempo real utilizando o sensor fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$. As figuras correspondem às seguintes frequências: (a) 600 Hz, (b) 2500 Hz e (c) 5000 Hz.

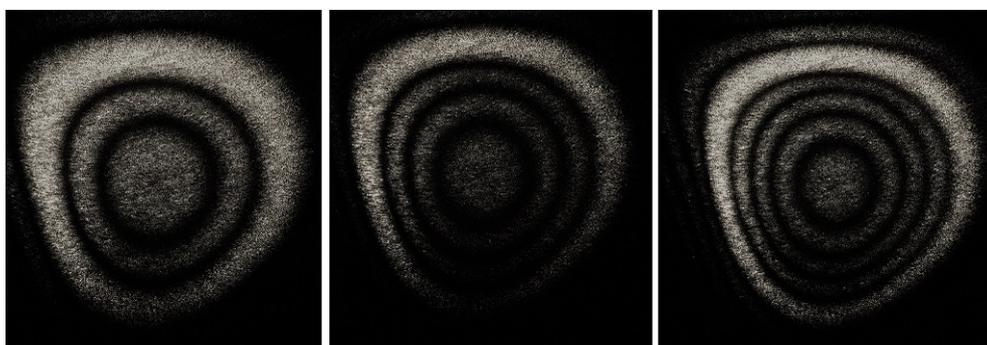


Figura 5.6: Mapas de vibração a uma mesma frequência (1kHz), variando sua amplitude de vibração correspondente a 800 mV, 900 mV e 1200 mV.

da franja clara. Isso está de acordo com o fato de que a intensidade das franjas é descrita pela Eq.(2.9). Na Fig.5.7 é mostrado o perfil em três dimensões do mapa de vibração correspondendo ao primeiro mapa de vibração a esquerda da Fig.5.6. Fica claro por essa figura que a maior intensidade corresponde a franja clara e que a medida que se afasta dessa franja a intensidade diminui.

Além da análise em “tempo real” do mapa de vibração é possível determinar a amplitude

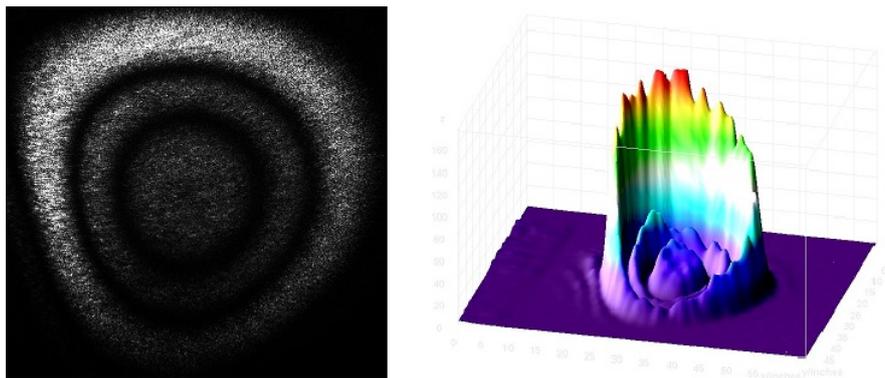


Figura 5.7: Perfil em três dimensões do mapa de vibração da membrana vibrando a uma frequência de 1 kHz e com uma amplitude igual a 800 mV.

de vibração local, ou seja, no centro da franja clara e no centro da franja escura. A medida foi realizada da seguinte forma: Tomando a franja mais clara como sendo aquela que indica que o sistema está localmente em repouso determina-se a partir dela os pontos de máximo e de mínimo (zero de intensidade) da Eq.(2.9), com esses valores e utilizando o fato que $A = MZ\lambda/4\pi$ onde MZ é o valor que determina o máximo ou o zero da função $J_0^2(x)$. Nas Figs.5.8 e 5.9 são mostradas a amplitude vibração no centro da franja clara e no centro da franja escura para as frequências iguais a 800 e 1000 Hz e 1611 Hz respectivamente em função da tensão aplicada ao alto-falante.

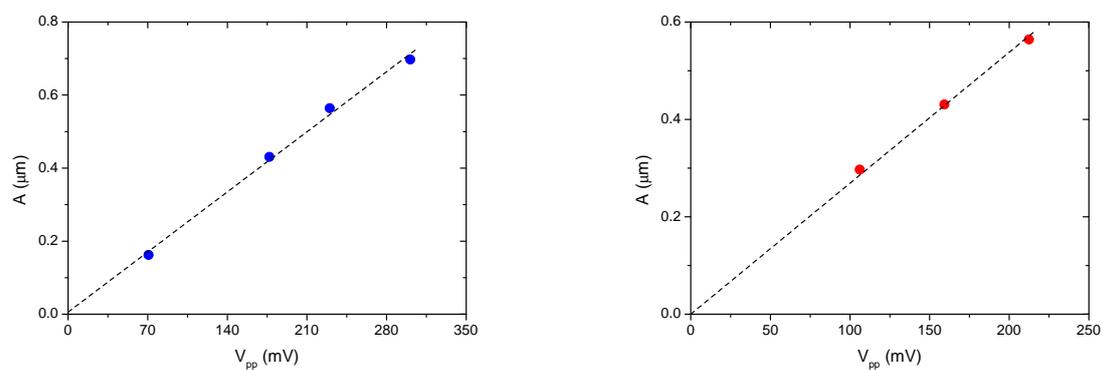


Figura 5.8: Amplitude de vibração no máximo da franja (local) em função da tensão aplicada ao gerador de funções. Membrana vibrando a 800 Hz (esquerda) e a 1000 Hz (direita).

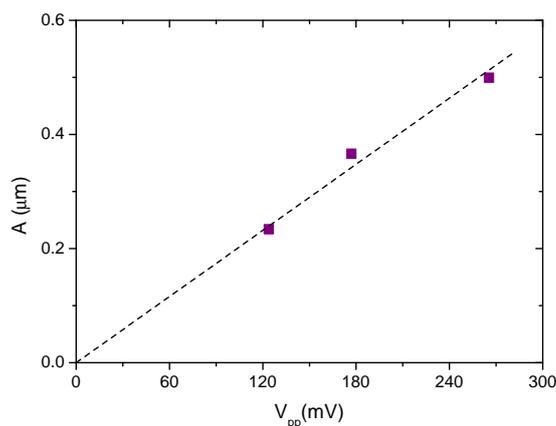


Figura 5.9: Amplitude de vibração no centro da franja escura (local) em função da tensão aplicada ao gerador de funções. Membrana vibrando a 1611 Hz.

5.4 Discussões e Conclusões

Nesta parte do trabalho foi utilizado o cristal fotorefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) nominalmente puro como sensor de vibração mecânica em 2D. Foi mostrado que os mapas de vibração obtidos são de excelente qualidade permitindo assim uma melhor análise do objeto. Verifica-se que além da qualidade do mapa de vibração os resultados obtido foram confiáveis e reproduzíveis, isso se deve ao uso da técnica do registro holográfico auto-estabilizado associado a difração anisotrópica apresentada pelo BTO.

Embora o sensor (cristal BTO) apresente baixa eficiência de difração, que é comum a esse tipo de cristal na ausência de campo elétrico externo, conseguiu-se ótimos mapas de vibração que permitiram determinar localmente a amplitude de vibração para várias frequências de vibração do objeto como mostrado nas Figs.5.8 e 5.9.

Capítulo 6

Estudo de deformações estáticas

6.1 Introdução

O estudo de deformações estáticas é um ramo importante da engenharia pois permite avaliar corpos de prova sem ter a necessidade de destruí-los, ou seja, em teste não destrutíveis [66]. Vários estudos neste sentido tem sido realizado tendo como ferramenta a técnica da interferometria holográfica [3]. Como já mencionado antes, a interferometria holográfica permite determinar deslocamentos e defeitos da ordem de grandeza de comprimentos de onda [3, 21] e por isso ela é uma técnica bastante interessante.

Neste capítulo utiliza-se o mesmo sensor, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO), porém com intuito de estudar as deformações estáticas. Para esse estudo utiliza-se também a técnica do deslocamento de fase descrita no Cap.4.

6.2 Experimento e Resultados

Apresenta-se nesta seção os experimentos realizados a montagem experimental utilizada assim como os resultados obtidos. O estudo das deformações estáticas foi realizado com o mesmo sensor BTO que foi aplicado ao estudo das vibrações mecânicas e foi utilizado o mesmo objeto como mostrado na Fig. 5.3.

Um esquema da montagem experimental utilizada para medidas de deformação mecânica é mostrada na fig.6.1. A montagem utilizada no estudo das deformações estáticas possui algumas diferenças em relação àquela utilizada para a medida de vibrações em 2D descrita anteriormente. Além disso, o processo de registro holográfico foi feito utilizando o sistema de registro estabilizado. Nesse processo utiliza-se um sinal externo como sinal de erro para corrigir as perturbações

de fase. O sinal externo tem como finalidade estabilizar o sistema e também permitir o uso da técnica do descolamento de fase estabilizado [5] que foi descrita no Cap.4.

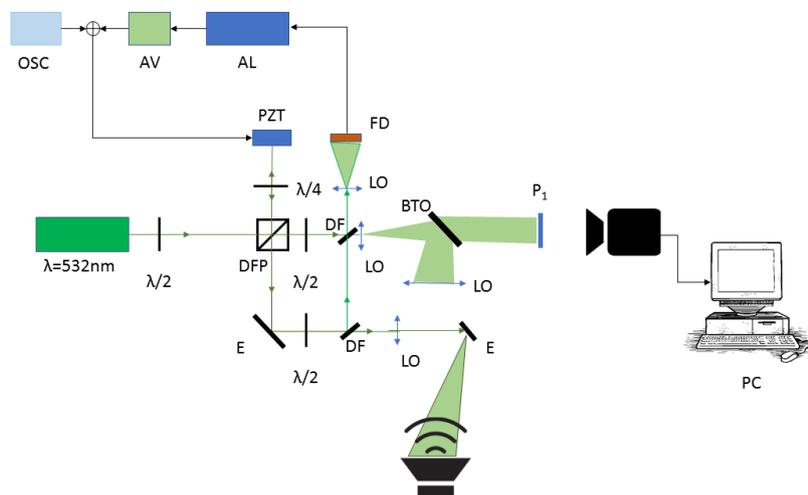


Figura 6.1: Montagem experimental para obtenção de mapas de fase de deformação mecânica. **DFP**: Divisor de Feixe Polarizado; $\lambda/2$ e $\lambda/4$: lâminas de meia onda e quarto de onda, respectivamente; **E**: espelhos; **DF**: Divisor de Feixe; **LO**: lente objetiva; **PZT**: espelho apoiado em um piezoelétrico; **P_1** : polarizador; **FD**: foto-detector; **AL**: amplificador lock-in; **AV**: fonte de alta tensão para o PZT; **BTO**: Cristal fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

A Fig.6.2 mostra as imagens de alguns padrões de franjas obtidos utilizando o sensor BTO para a membrana deformada em diferentes condições. Pela Fig.6.2 fica claro que é possível perceber deformações pequenas nas franjas, isso indica a sensibilidade do sensor.

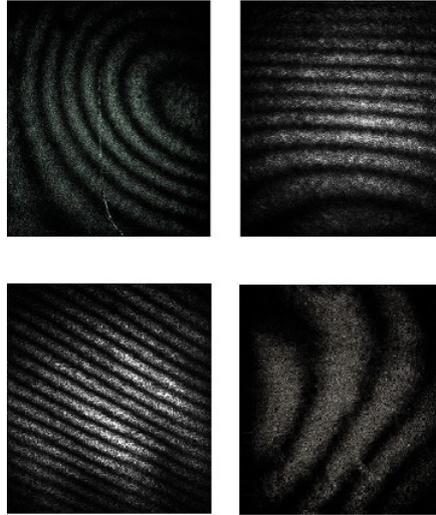


Figura 6.2: Deformação das franjas obtidas com o sensor BTO após a deformação da membrana devido a cargas aplicadas em diferentes pontos.

Utilizando a montagem experimental mostrada na Fig.6.1 com uma fonte de luz laser de comprimento de onda 532 nm estuda-se a deformação de uma membrana circular de diâmetro aproximado de 8 cm, pintada com uma tinta retro-refletora. O experimento consiste em registrar durante algum tempo o holograma da membrana. Depois que o registro atinge o estado estacionário corta-se os feixes referência e objeto com o auxílio dos "shutters". Depois disso deforma-se a placa aplicando uma carga sobre ela. Com os "shutters" fechados desloca-se a fase aplicando a técnica de deslocamento de fase desenvolvida no laboratório. Repete-se esse procedimento quatro vezes para obter os interferogramas, como os mostrados na Fig. 6.3.

O mapa de fase é então determinado através da seguinte relação [32],

$$\phi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (6.1)$$

onde I_j com $j = 1, 2, 3$ e 4, são os padrões de franjas defasados de $\pi/2$. Utilizando os padrões mostrados na Fig.6.3 determina-se o mapa de fase correspondente que é mostrado na Fig.6.4.

Após obter o mapa de fase pode-se traçar seu perfil, apresentado na fig. 6.5. O perfil do mapa de fase mostrado possui uma característica de dente de serra que é correspondente a técnica de deslocamento de fase (módulo 2π) [7] e além disso indica também a qualidade das imagens (interferogramas) utilizadas no cálculo do mapa de fase.

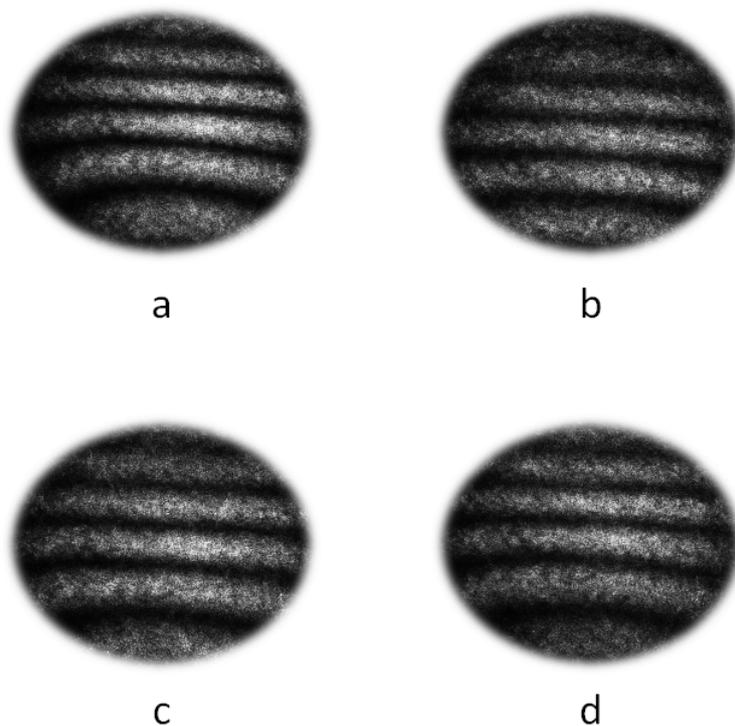


Figura 6.3: Padrões de intensidade de franjas com deslocamento sucessivo de $\pi/2$. Onde a representa o deslocamento 0 e na sequência b, c e d, representam $\pi/2$, π e $3\pi/2$, respectivamente

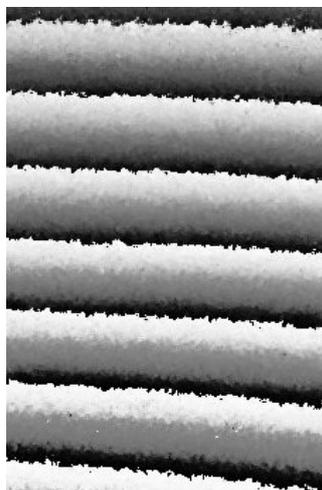


Figura 6.4: Mapa de fase correspondente aos padrões mostrados na Fig.6.3.

6.3 Discussões e Conclusões

Neste capítulo mostra-se que o uso do sensor $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) associado às técnicas do registro holográfico estabilizado (com sinal de erro externo) e a do deslocamento de fase de forma estabilizada permiti obter mapas de fase de boa qualidade. Isso fica evidenciado quando analisa-se

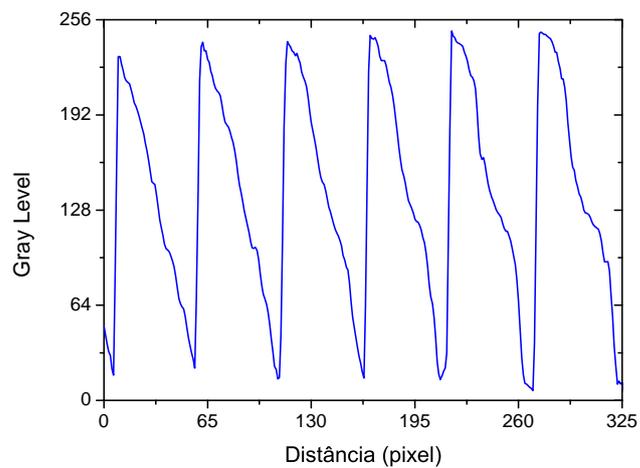


Figura 6.5: Perfil do mapa de fase

o mapa de fase (Fig.6.4) obtido. Isso é corroborado com o perfil do mapa de fase.

A qualidade no mapa de fase e a reprodutibilidade dos resultados são, em grande parte, devido a utilização da técnica estabilizada de gravação do holograma da membrana antes da deformação assim como os deslocamentos precisos e sucessivos de $\pi/2$ que a técnica do deslocamento de fase estabilizado permite.

Capítulo 7

Conclusões gerais do trabalho

Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de interferometria holográfica para o estudo de vibrações mecânicas de 2D e também de deformações estáticas. Para ambos os estudos foi utilizado o cristal fotorrefrativo $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) nominalmente puro como sensor.

Dentre os vários cristais fotorrefrativos da família das Silenitas a escolha do cristal BTO se deve ao fato que nesse cristal é possível obter hologramas mais eficientes do que em outros cristais da mesma família tais como o $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) e $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) em vista que o coeficiente eletro-óptico do BTO ($r_{eff}=5.5$ pm/V) é maior em relação aos outros cristais, 5.0 pm/V para o BSO e 3.5 pm/V para o BGO[67, 68]. Um dos fatores que podem diminuir a eficiência de difração é a atividade óptica. Para as mesmas condições de gravação quanto maior a atividade óptica menor a eficiência de difração. Em comparação a atividade óptica o BTO apresenta $\rho=11^\circ$, o BGO $\rho=34^\circ/\text{mm}$ e o BSO $\rho=38^\circ/\text{mm}$ para o comprimento de onda 532 nm.

Verifica-se que o uso do sensor BTO se mostrou bastante eficiente na obtenção dos mapas de vibração assim como dos mapas de fase. A qualidade dos respectivos mapas também se deve ao uso de técnicas holográficas estabilizadas para a gravação dos hologramas sobretudo no caso da medida de vibração mecânica em 2D. Utilizando a holografia em média temporal conseguimos determinar a amplitude de vibração local de uma membrana de metal para diferentes frequência de vibração.

As técnicas de estabilização foram fundamentais para a obtenção dos resultados mostrados e foram facilmente aplicadas em conjunto com outras técnicas, como a holografia interferométrica em média temporal. Além disso, com o conhecimento adquirido foi desenvolvida a técnica do deslocamento de fase estabilizada. Os resultados desse estudo foram publicados na revista de circulação internacional **Optik** [5]. Essa técnica permitiu obter mapas de fase de excelente

qualidade e foi utilizada neste trabalho para o estudo de deformações estáticas.

Embora os resultados obtidos com o sensor $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO), com $\lambda=532$ nm, foram de maneira geral bastante interessantes tanto na medida de vibração quanto na medida de deformação seria interessante como trabalho futuro a utilização desse mesmo sensor porém com outro comprimento de onda, como por exemplo um na faixa do vermelho 633 nm. Nessa faixa de comprimento de onda o coeficiente de absorção do BTO é menor ($40\text{-}90\text{ m}^{-1}$) em comparação ao coeficiente de absorção no comprimento de 532 nm que é da ordem de 850 m^{-1} . Sendo a absorção menor o holograma será formado de maneira mais uniforme no volume do material e como consequência mais eficiente.

Apêndice A

Artigo publicado

Optik - International Journal for Light and Electron Optics 178 (2019) 879–883



Contents lists available at ScienceDirect

Optik

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijleo



Original research article

Accurate $\pi/2$ -phase shifting setup for a stabilized interference pattern of light fringes



Ivan de Oliveira^{a,*}, Flávio Borges Bertasso^a, Marc Georges^b, Jaime Frejlich^c

^a GOMNI-Grupo de Óptica e Modelagem Numérica, Faculdade de Tecnologia/UNICAMP, Limeira, SP, Brazil

^b Centre Spatial de Liège, Université de Liège, Belgium

^c Instituto de Física “Gleb Wataghin”/UNICAMP, Campinas, Brazil

ARTICLE INFO

PACS:
42.87.Bg
06.20.Dk
07.60.Ly

Keywords:
Phase-shifting
Metrology
Interferometry

ABSTRACT

We report on a technique for accurately $\pi/2$ -phase shifting a stabilized interference pattern of light fringes used for building up a map of phase for 2D deformation measurement. This technique is based on the use of low amplitude phase modulation on the setup in order to generate first and second harmonics temporal terms in the pattern of light to operate an actively stabilized setup. Particular features of this stabilization setup allow one to use them for accurate $\pi/2$ -phase shifting with the practical advantage of operating on an already stabilized pattern of fringes.

1. Introduction

Optical interferometry encompasses whole field and contactless measurement techniques, with a large variety of applications [1]. In addition, it can be very fast and sensitive, allowing to measure optical phase variations of the order of the wavelength [2]. Short wavelengths have the interest that very small variations can be measured, but in turn, the stability of the setup needs to be such that unwanted optical phase variations due to environmental perturbations are much smaller than the wavelength. Among those techniques, holographic interferometry is very interesting and has been used in many applications in optical metrology and non-destructive testing [4,3,5,6]. However, interferometric holographic setups are highly sensitive to different types of perturbations. The former means that it is difficult to obtain reproducible and reliable data, mainly in experiments to measure phase differences. A way to reduce the instability in a holographic experimental setup, caused by environmental perturbations is to use very large wavelengths, but at the expense of the measurement sensitivity [7–9]. Another way is to perform an actively stabilized process. Several works have used this process in order to reduce the instability in an experimental setup [10–17]. Phase variations due to external variations are measured and used as an error signal which in turn actuates a mirror in the reference path to cancel the effect of perturbations. In applications using holographic interferometry, the parameters of interest can be extracted from measurements of phase difference between the object and the reference beams. For that purpose, some techniques for phase quantification are required. The better known and largely applied is temporal phase-shifting [18–23] which is usually implemented by capturing consecutive interferograms with a specific and well calibrated phase-shift between them. At the experimental point-of-view, phase steps are induced by moving a mirror mounted on a piezo-electric translator placed usually in the reference beam path. In previous works, an actively stabilized setup with possibility of additional phase-shifting was developed that was able to perform phase-shifting [13,14]. However, contrarily to other phase-stabilized setup, it did not use a fast lock-in amplifier but instead a quadrature phase analysis system which

* Corresponding author.

E-mail address: ivan@ft.unicamp.br (I. de Oliveira).

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.090>

Received 19 September 2017; Received in revised form 3 October 2018; Accepted 12 October 2018

0030-4026/ © 2018 Elsevier GmbH. All rights reserved.

Apêndice B

Trabalho publicado em congresso



Photorefractive Crystal-Based Measurement Of 2D Mechanical Vibrations

Ivan de Oliveira¹, Flávio Borges Bertasso¹, Danilo Augusto Capovilla¹, Marc P. Georges², Jaime Frejlich³

¹Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, Limeira-SP, Brazil.

²Centre Spatial de Liège, Université de Liège, Belgium.

³Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, Campinas-Brazil.

e-mail: ivan@ft.unicamp.br

Photorefractive materials are photoconductive and electrooptics and are particularly suited for almost real-time reversible optical recording by transforming a spatially modulated illumination pattern into a corresponding volume index-of-refraction modulation that can be read using an auxiliary probe beam [1]. These materials are also useful as high capacity volume memories [2], for optical components fabrication [3] and various nondestructive metrology applications [4].

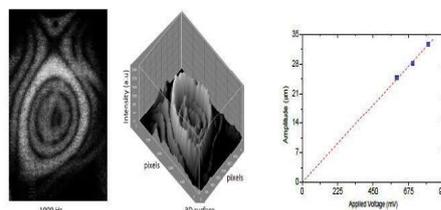
The use of photorefractive holographic interferometric techniques (PRHI) for measuring 2D mechanical vibrations as well as deformations in 2D has been already reported before [5, 6, 7, 8] and is of the highest practical interest. The so-called “Time-average holographic interferometry” (TAHI) technique is the one suitable for 2D mechanical vibration measurement whereas the “Double exposure” (DEHI) technique is the one adequate for

surface deformation, both techniques based on the high spatial resolution and relatively slow time-response of photorefractive materials at low light irradiances.

Both TAHI and DEHI are well known techniques and already described in the literature [9, 10, 11].

In this work we report the 2D mechanical vibrations measurement, as seen in Figs.1a and 1b for loudspeaker membrane vibration at 1000 Hz, as measured using a new compact low cost actively stabilized setup using a low power laser and a photorefractive sillenite crystal as optical sensor.

Keywords: Photorefractive Materials; Sillenites; Vibration Analysis



(a) Loudspeaker membrane vibration at 1000 Hz and 3D surface analyzed by time-average holographic interferometry technique in our setup.

(b) Vibration amplitude as a function of the applied voltage for a signal of 1000 Hz. The vibration amplitude computed as described in elsewhere [1].

Figure 1

Bibliografia

- [1] J. Frejlich. *Photorefractive Materials: Fundamental Concepts, Holographic Recording, and Materials Characterization*. Wiley-Interscience, New York, 2006.
- [2] Eduardo A. Barbosa, Jaime Frejlich, Victor V. Prokofiev, N. J. H. Gallo, and Jose P. Andreetta. Adaptive holographic interferometry for two-dimensional vibrational mode display. *Optical Engineering*, 33(8):2659–2662, 1994.
- [3] M.P. Georges and P.C. Lemaire. Real-time holographic interferometry using sillenite photorefractive crystals. study and optimization of a transportable set-up for quantified phase measurements on large objects. *Applied Physics B*, 68(5):1073–1083, 1999.
- [4] Katherine Creath. Phase-shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 24(18):3053–3058, Sep 1985.
- [5] Ivan de Oliveira, Flávio Borges Bertasso, Marc Georges, and Jaime Frejlich. Accurate $\pi/2$ -phase shifting setup for a stabilized interference pattern of light fringes. *Optik*, 178:879 – 883, 2019.
- [6] Giancarlo Pedrini, Wolfgang Osten, and Mikhail E. Gusev. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement. *Appl. Opt.*, 45(15):3456–3462, May 2006.
- [7] T. Kreis. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. Wiley, 2004.
- [8] L. Cescato, G. F. Mendes, and J. Frejlich. Stabilized holographic recording using the residual real-time effect in a positive photoresist. *Opt. Lett.*, 12:982–983, 1987.
- [9] S. Bian and J. Frejlich. Actively stabilized holographic recording for the measurement of photorefractive properties of a Ti-foped KNSBN crystal. *J. Opt. Soc. Am. B*, 12:2060–2065, 1995.

- [10] S.R. Guntaka, J. Raghavendra, V. Toal, I. Naydenova, S. Martin, and S. Mintova. A compact electronic speckle pattern interferometry system using a photopolymer reflection holographic optical element. In Wolfgang Osten, editor, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, volume 5856 PART I, pages 152–157, Bellingham, WA, 2005. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [11] A.J. Decker. Holographic interferometry with an injection seeded Nd:YAG laser and two reference beams. *Appl. Opt.*, 29:2696–2700, 1990.
- [12] A. Bonarou and L. Antonucci and V. Tornari and S. Georgiou and C. Fotakis. Holographic interferometry for the structural diagnostics of UV laser ablation of polymer substrates. *Appl. Phys. A*, 73:647–651, 2001.
- [13] J. P. Huignard, J. P. Herriau, and T. Valentin. Time average holographic interferometry with photoconductive electrooptic $Bi_{12}SiO_{20}$ crystals. *Appl. Opt.*, 16:2796–2798, 1977.
- [14] J. Frejlich. *Photorefractive Materials: Fundamental Concepts, Holographic Recording and Materials Characterization*. Wiley, 2007.
- [15] R.G. Driggers. *Encyclopedia of Optical Engineering: Abe-Las, pages 1-1024*. Dekker Encyclopedias Series. Marcel Dekker, 2003.
- [16] T. J. Hall, R. Jaura, L. M. Connors, and P. D. Foote. The Photorefractive Effect - A Review. *Progress in Quantum Electronics*, 10:77–146, 1985.
- [17] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii. Holographic storage in electrooptic crystals. i. steady state. *Ferroelectrics*, 22:949–960, 1979.
- [18] Ivan de Oliveira. Modulação de índice de refração de grande amplitude em cristais fotorrefrativos. Master's thesis, Unicamp, 2000.
- [19] H. Kogelnik. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings. *Bell Syst. Tech. J.*, 48:2909–2947, 1969.
- [20] Jaime Frejlich. *Óptica*. Oficina de Textos, 2011.
- [21] M.P. Georges, V.S. Scauffaire, and P.C. Lemaire. Compact and portable holographic camera using photorefractive crystals. Application in various metrological problems. *Appl. Phys. B*, 72(6):761–765, 2001.

- [22] Thomas D. Rossing. Chladni's law for vibrating plates. *American Journal of Physics*, 50(3):271–274, 1982.
- [23] DA Russell, DE Parker, and RS Hughes. Analysis of standing sound waves using holographic interferometry. *American Journal of Physics*, 77(8):678–682, 2009.
- [24] JD Fieldhouse and TP Newcomb. Double pulsed holography used to investigate noisy brakes. *Optics and Lasers in Engineering*, 25(6):455–494, 1996.
- [25] Paulo Acioly M. Dos Santos, Lucila Cescato, and Jaime Frejlich. Interference-term real-time measurement for self-stabilized two-wave mixing in photorefractive crystals. *Opt. Lett.*, 13(11):1014–1016, Nov 1988.
- [26] Eduardo A. Barbosa, Jaime Frejlich, Victor V. Prokofiev, N. J. Heraldo Gallo, and Jose Pedro Andreeta. Adaptive holographic interferometry for two-dimensional vibrational mode display. *Optical Engineering*, 33(8):2659 – 2662, 1994.
- [27] J. Frejlich, L. Cescato, and G. F. Mendes. Analysis of an active stabilization system for a holographic setup. *Appl. Opt.*, 27:1967–1976, 1988.
- [28] A. A. Kamshilin, J. Frejlich, and L. Cescato. Photorefractive Crystals for the Stabilization of the Holographic Setup. *Appl. Opt.*, 25:2375–2381, 1986.
- [29] Jaime Frejlich. Real-time photorefractive hologram phase-shift measurement and self-diffraction effects. *Optics Communications*, 107(3–4):260 – 264, 1994.
- [30] Jan P. von Bassewitz, Ivan de Oliveira, and Jaime Frejlich. Self-stabilized recording of fixed gratings at high temperature in linbo3:fe. *Appl. Opt.*, 47(29):5315–5320, Oct 2008.
- [31] Ivan de Oliveira, Jaime Frejlich, Luis Arizmendi, and Mercedes Carrascosa. Self-stabilized holographic recording in reduced and oxidized lithium niobate crystals. *Optics communications*, 229(1):371–380, 2004.
- [32] R. Sirohi. *Optical Methods of Measurement: Wholefield Techniques, Second Edition*. Optical Science and Engineering. CRC Press, 2009.
- [33] Daniel Malacara. *Optical Shop Testing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, Totonto, Singapore, 1992.
- [34] Philippe Lemaire and Marc Georges. *Dynamic Holographic Interferometry: Devices and Applications*, volume 115, pages 223–251. 08 2007.

- [35] J.Frejlich and P.M.Garcia. Advances in real-time holographic interferometry for the measurement of vibrations and deformations. *Optics & Lasers Engineering*, 32:515–527, 1999.
- [36] B. Pouet and S. Krishnaswamy. Dynamic holographic interferometry by photorefractive crystals for quantitative deformation measurements. *Applied Optics*, 35:787–794, 1996.
- [37] Igor Alexeenko, Jean-François Vandenrijt, Giancarlo Pedrini, Cedric Thizy, Birgit Volheim, Wolfgang Osten, and Marc Georges. Nondestructive testing by using long-wave infrared interferometric techniques with co2 lasers and microbolometer arrays. *Applied optics*, 52:A56–67, 01 2013.
- [38] Jean-François Vandenrijt, Cédric Thizy, Patrick Queeckers, Frank Dubois, Dominic Doyle, and Marc P. Georges. Long-wave infrared digital holographic interferometry with diffuser or point source illuminations for measuring deformations of aspheric mirrors. *Optical Engineering*, 53(11):1 – 9, 2014.
- [39] Marc Georges. *Long-Wave Infrared Digital Holography*, chapter 6, pages 219–254. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [40] Emilio J. Ambite and Luis Arizmendi. Feedback-controlled recording and fixing of photorefractive holograms in reflection geometry on lithium niobate crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 28(5):1161–1167, May 2011.
- [41] L. F. Avila, A. A. Freschi, and Lucila Cescato. Holographic technique for measurement of the kinetic constant and optical modulation of photosensitive materials. *Appl. Opt.*, 49(18):3499–3505, Jun 2010.
- [42] J. Frejlich, I. de Oliveira, L. Arizmendi, and M. Carrascosa. Fixed holograms in iron-doped lithium niobate: simultaneous self-stabilized recording and compensation. *Appl. Opt.*, 46:227–233, 2007.
- [43] Luciano De Sio, Roberto Caputo, Antonio De Luca, Alessandro Veltri, Cesare Umeton, and Andrey V. Sukhov. In situ optical control and stabilization of the curing process of holographic gratings with a nematic film-polymer-slice sequence structure. *Appl. Opt.*, 45(16):3721–3727, Jun 2006.
- [44] Cédric Thizy, Marc Georges, Philippe Lemaire, Yvan Stockman, and Dominic Doyle. Phase control strategies for stabilization of photorefractive holographic interferometer. In Pierre

- Slangen and Christine Cerruti, editors, *Speckle06: Speckles, From Grains to Flowers*, volume 6341, pages 364 – 369. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [45] B. Sturman, E. Podivilov, and M. Gorkunov. Regimes of feedback-controlled beam coupling. *Phys. Rev. E*, 72:016621, Jul 2005.
- [46] Maxim Gorkunov, Boris Sturman, M. Luennemann, and Karsten Buse. Feedback-controlled two-wave coupling in reflection geometry: Application to lithium niobate crystals subjected to extremely high external electric fields. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 77:43–48, 08 2003.
- [47] Xiangjun Dai, Hai Yun, Xinxing Shao, Yanxia Wang, Donghuan Zhang, Fujun Yang, and Xiaoyuan He. Thermal residual stress evaluation based on phase-shift lateral shearing interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 105:182 – 187, 2018.
- [48] Xiangjun Dai, Xinxing Shao, Lijun Li, Cong Liu, Meiling Dai, Hai Yun, and Fujun Yang. Shape measurement with modified phase-shift lateral shearing interferometry illumination and radial basis function. *Appl. Opt.*, 56(21):5954–5960, Jul 2017.
- [49] Reena Disawal, Jitendra Dhanotia, and Shashi Prakash. Phase-shifting lateral shearing interferometry using wedge-plate and interferometric grating. *Appl. Opt.*, 53(31):7534–7539, Nov 2014.
- [50] Jae Bong Song, Yun Woo Lee, In Won Lee, and Yong-Hee Lee. Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer. *Appl. Opt.*, 43(20):3989–3992, Jul 2004.
- [51] Katherine Creath. V phase-measurement interferometry techniques. volume 26 of *Progress in Optics*, pages 349 – 393. Elsevier, 1988.
- [52] B. Pouet and S. Krishnaswamy. Dynamic holographic interferometry by photorefractive crystals for quantitative deformation measurements. *Appl. Opt.*, 35:787–794, 1996.
- [53] Marcos Roberto da Rocha Gesualdi and Mikiya Muramatsu. Técnicas de interferometria holográfica usando cristais fotorrefrativos da família das silenitas do tipo $\text{bi}_{12}\text{siO}_{20}$ (bso). Master’s thesis, Universidade de São Paulo, 2000.
- [54] J. D. Fieldhouse and T. P. Newcomb. Self-excited brake noise investigation using the technique of classical holographic interferometry. In Enrico Primo Tomasini, editor, *First*

- International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, volume 2358, pages 346 – 358. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1994.
- [55] G.A. Slettemoen. Electronic speckle pattern interferometric system based on a speckle reference beam. *Appl. Opt.*, 19:616–623, 1980.
- [56] K. Creath and G.A. Slettemoen. Vibration-observation techniques for digital speckle-pattern interferometry. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2:1629–1636, 1985.
- [57] F.M. Santoyo, M.C. Shellabear, and J.R. Tyrer. Whole field in-plane vibration analysis using pulsed phase-stepped ESPI. *Appl. Opt.*, 30:717–721, 1991.
- [58] O.J. Lekberg. ESPI—The ultimate holographic tool for vibration analysis? *J. Acoust. Soc. Am.*, 75:1783–1791, 1984.
- [59] V. Bavigadda, E. Mihaylova, R. Jallapuram, and V. Toal. Vibration phase mapping using holographic optical element-based electronic speckle pattern interferometry. *Opt. Laser Eng.*, 50:1161–1167, 2012.
- [60] A. Hafiz, R. Magnusson, J. S. Bagby, D. R. Wilson, and T. D. Black. Visualization of aerodynamic flow fields using photorefractive crystals. *Appl. Opt.*, 28:1521–1524, 1989.
- [61] R. Magnusson, A. Hafiz, J.S. Bagby, and A. Haji-Sheikh. Holographic interferometry using self-developing optical crystals for heat flux evaluation. *Journal of Electronic Packaging*, 112:255–260, 1990.
- [62] R. Magnusson, X. Wang and A. Haji-Sheikh. Real-time interferometry with photorefractive reference holograms. *Appl. Opt.*, 32:1983–1986, 1993.
- [63] R. Müller, M. T. Santos, L. Arizmendi, and J. M. Cabrera. A narrow-band interference filter with photorefractive LiNbO₃. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 27:241–246, 1994.
- [64] M. P. Georges and Ph.C. Lemaire. Phase-shifting real-time holographic interferometry that uses bismuth silicon oxide crystals. *Appl. Opt.*, 34:7497–7506, 1995.
- [65] A. A. Kamshilin and M. P. Petrov. Continuous reconstruction of holographic interferograms through anisotropic diffraction in photorefractive crystals. *Opt. Commun.*, 53:23–26, 1985.

- [66] Marcos Gesualdi, D. Soga, and Mikiya Muramatsu. Phase-shifting real-time holography with photorefractive crystals - art. no. 60272g. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 01 2006.
- [67] I. de Oliveira, T.O. dos Santos, J.F. Carvalho, and J. Frejlich. Electro-optic coefficient and wavelength dispersion in sillenite crystals. *Appl. Phys. B*, 105:301–304, 2011.
- [68] D.G. Papazoglou, A.G. Apostolidis, and E.D. Vanidhis. Index of refraction, optical activity and electro-optic coefficient of bismuth titanium oxide (bi12tio20). *Applied Physics B*, 65(4):499–503, 1997.