

Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física “Gleb Wataghin”

*Departamento de Física de Matéria Condensada
Laboratório de Óptica*

Tese de Doutorado

Construção de Telas Holográficas e Aplicações

Daniel Souza Ferreira Magalhães

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi (orientador) – IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Manuel Giles Antunez de Mayolo – IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Luis Eduardo Evangelista de Araujo – IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Fernando de Souza Barros – IF/UFRJ

Prof. Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho – DF/PUC - Rio de Janeiro

Prof. Dr. Mikiya Muramatsu (suplente) – IF/USP

Prof. Dr. Lucila Helena Deliesposte Cescato (suplente) – IFGW/UNICAMP

Tese apresentada ao Instituto de Física
“Gleb Wataghin” para a obtenção do
título de Doutor em Física

13 de Agosto de 2009

*Este exemplar corresponde à redação final da tese de doutorado defendida
pelo aluno Daniel Souza Ferreira Magalhães e aprovada pela comissão julgadora.*


26 de agosto de 2009
PROF. JOSÉ J. LUNAZZI

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IFGW - UNICAMP**

M27c

Magalhães, Daniel Souza Ferreira
Construção de telas holográficas e aplicações / Daniel
Souza Ferreira Magalhães. -- Campinas, SP : [s.n.], 2009.

Orientador: José Joaquín Lunazzi.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Física "Gleb Wataghin".

1. Telas holográficas. 2. Difração. 3. Imagens
tridimensionais. 4. Holografia. I. Lunazzi, José Joaquín.
II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física
"Gleb Wataghin". III. Título.

(vsv/ifgw)

- **Título em inglês:** Construction of holographic screens and their applications
- **Palavras-chave em inglês (Keywords):**
 - 1. Holographic screens
 - 2. Diffraction
 - 3. Three-dimensional images
 - 4. Holography
- **Área de concentração:** Ótica
- **Titulação:** Doutor em ciências
- **Banca examinadora:**
 - Prof. José Joaquín Lunazzi
 - Profª Isabel Cristina dos Santos Carvalho
 - Prof. Fernando de Souza Barros
 - Prof. Carlos Manuel Giles Antúnez de Mayolo
 - Prof. Luis Eduardo Evangelista de Araújo
- **Data da defesa:** 13-08-2009
- **Programa de Pós-Graduação em:** Física



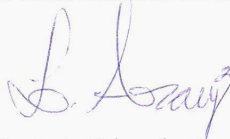
Secretaria de Pós-Graduação - Tel: (19) 3521-5305 FAX: (19) 3521-4142

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **DANIEL SOUZA FERREIRA MAGALHÃES - RA 995027**, APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN” DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, EM 13/08/2009.

COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi - DFMC/IFGW/UNICAMP
(Orientador do Candidato)


Prof. Dr. Carlos Manuel Giles Antunez de Mayolo DFMC/IFGW/UNICAMP


Prof. Dr. Luis Eduardo Evangelista de Araujo
DEQ/IFGW/UNICAMP


Prof. Dr. Fernando de Souza Barros - IF/UFRJ


Profa. Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho – DF/PUC-Rio de Janeiro

.

Aos meus queridos amigos
Rolando, Sérgio, Edemir e Pepe
por toda a assistência em todas as horas.

.

Agradecimentos

À minha família pelo apoio durante todo meu processo de formação.

Ao professor J. J. Lunazzi pela orientação, amizade, ensinamentos e conhecimentos a mim transmitidos. A Cristina, sua esposa, pela imensa amizade e carinho ao longo desses preciosos anos. Um beijão a minha mãe campineira.

À grande amiga Noemí I. R. Rivera por sua amizade e companheirismo no trabalho durante os primeiros dois anos de trabalho na tese.

À grande amiga Maria Clara I. Amon pela amizade e cumplicidade no trabalho de gravação de telas no chão do laboratório. Ao trabalho com lasers de diodo e nossas discussões sobre ensino de física. Obrigado por sempre estar do nosso lado!

Aos amigos do laboratório: Jacson, Flávia, Luis Gutierrez, Luis, Tati, Renata, Lau, Erô, Del, Dona Neuza, Nilson, Edson, Fabíola, Do Carmo; pela amizade e pelas colaborações nos trabalhos. Às festinhas de aniversário, despedida, recepção, defesas, ..., ou seja, a todas as desculpas que inventávamos para confraternizar.

Aos bolsistas SAE da Unicamp pela ajuda, amizade e cooperação nos trabalhos com a Exposição de Holografia. Abraço especial para André e Richard.

Aos professores Lucila e Jaime por suas amizades e companheirismos.

Aos professores e amigos cubanos que conheci em minha estadia de dois meses: família Serra, Carlos, Llovera, Alfredo, Deysi, Juan, Aris, Hilario, e tantos outros amigos muito especiais.

A meu irmão Rolando L. Serra Toledo por sua preciosa amizade e grande competência

que ajudou no êxito dessa tese de doutorado. Hermano, un fuerte abrazo!

RESUMO

A Tela holográfica é um elemento óptico difrativo gerado pela interferência de dois feixes de maneira a redistribuir convenientemente para um observador a luz que recebe com o objetivo de visualização de imagens sem óculos e com paralaxe.

Neste trabalho descrevemos alguns métodos de obtenção de telas holográficas para aplicações em projeções com luz branca. As fundamentamos, analisamos os resultados obtidos, assim como descrevemos suas aplicações.

TÍTULO

Construcción de pantallas holográficas y aplicaciones

RESUMEN

La pantalla holográfica es un elemento óptico difractivo generado por la interferencia de dos haces de modo que redistribuya convenientemente para un observador la luz que recibe con el objetivo de visualizar imágenes sin anteojos y con paralaje.

En este trabajo describimos diferentes métodos de obtención de pantallas holográficas para aplicaciones en proyecciones con luz blanca. Las fundamentamos, analizamos los resultados obtenidos y describimos sus aplicaciones.

TITLE

Construction of holographic screens and their applications

ABSTRACT

Holographic screen is a diffractive optical element generated by the interference of two beams in order to properly distribute to an observer the light it receives with the purpose of viewing parallax images without glasses.

This work describes some methods for obtaining holographic screens looking forward applications with white light. We substantiate, analyze the results and describe their applications.

TITOLO

Konstruado kaj aplikado de holografiaj ekranoj

RESUMO

Holografia ekranon estas difrakta optika elemento farita per du faska interferenco por redistribui al observanto la ricevitan lumon tiel ke li spektas tridimensiajn bildojn sen bezoni specialajn okulvitrojn.

Tiu esploro priskribas kelkajn faradmetodojn por aplikado per blanka lumo projektado. Ni fundamentigas, analizas la rezultojn kaj priskribas la aplikadon.

Apresentação

A estrutura desta dissertação está apresentada da seguinte forma:

Na Parte I introduzimos os conceitos necessários para o entendimento das telas holográficas, mostramos e comparamos nosso trabalho com os da atualidade no mundo além de apresentar os objetivos e a novidade científica da tese.

Na Parte II distinguimos cada um dos tipos de telas holográficas desenvolvidas e explicamos seu funcionamento com luz monocromática e luz branca.

Na Parte III mostramos como se realizou a construção de cada uma das telas holográficas.

Na Parte IV apresentamos as aplicações desenvolvidas na tese.

Na Parte V estão as conclusões que resumizam os resultados alcançados.

Na Parte VI apresentamos as referências organizadas por ordem de aparição de todo o trabalho.

Na Parte VII encontram-se os apêndices, que são trabalhos relacionados com a tese mas não presentes no núcleo central. As referências bibliográficas estão separadas por apêndice.

As notas de rodapé da tese são numeradas por capítulo.

.

Sumário

I	Introdução	1
1	Introdução	3
1.1	Difração	5
1.1.1	Traçado de raios: difração por uma estrutura periódica	7
1.2	Lentes Difrativas	9
1.2.1	Placas Zonais ou Lentes Difrativas em eixo	9
1.2.2	Comparação entre as Lentes Difrativas e Refrativas	11
1.3	Holografia e Holoimagens	12
1.3.1	Holografia e a reconstrução de uma frente de onda	12
1.3.2	Holoimagem, uma imagem <i>holo</i> sem o registro	16
1.4	Processo de codificação e decodificação por difração	16
1.5	Sistemas atuais de imagens que se assemelham às holográficas	21
1.5.1	Sistemas Pseudo 3D	21
1.5.2	Sistemas de imagens 3D	23
1.6	Motivação para a construção de Telas Holográficas e suas aplicações	25
1.7	Objetivos gerais da tese de doutorado	27
1.8	Novidade científico - técnica na tese de doutorado	28

II	Telas Holográficas	29
2	Telas holográficas simples	33
2.1	Rede de difração usada como tela holográfica	33
2.2	Descrição geométrica das telas holográficas simples	36
2.3	Descrição ondulatória das telas holográficas simples	38
2.4	Reconstrução de um ponto objeto com uma tela holográfica simples . .	44
3	Telas holográficas com extensão de campo vertical	47
3.1	Telas holográficas horizontalmente dispersivas	48
3.2	Telas holográficas verticalmente dispersivas	49
III	Construção de Telas Holográficas	51
4	Gravação de Telas Holográficas Simples	53
4.1	Telas simples com dois feixes divergentes	53
4.2	Telas holográficas simples de curta distância focal	55
4.3	Análise das telas holográficas simples e resultados experimentais obtidos	58
5	Gravação de Telas Holográficas com extensão de campo vertical	63
5.1	Tela holográfica horizontalmente dispersiva	63
5.2	Tela holográfica verticalmente dispersiva	64
5.3	Análise das telas holográficas com extensão de campo vertical e resulta- dos experimentais obtidos	67
6	Processamento químico na gravação das telas holográficas	71
6.1	Introdução	71
6.1.1	Emulsão de Haleto de Prata	71
6.1.2	Filme Agfa-Gevaert 8E75 HD	74
6.2	Processo de Revelação das telas holográficas	75

6.3	Processo de Branqueamento das telas holográficas	76
6.3.1	Comparação entre dois processos químicos utilizados	78
IV	Aplicações	79
7	Sistema de Holo-televisão com plano único	81
7.1	Introdução	81
7.2	Descrição	83
7.3	Resultados e Análise	84
7.4	Conclusão	86
8	Sistema de Holo-televisão com plano único a cores	87
8.1	Introdução	87
8.2	Descrição	88
8.2.1	Imagem bicromática obtida com Laser Ti:Sa e fibra fotônica . .	88
8.2.2	Imagem tricromática obtida com projetores	90
8.3	Resultados	90
8.3.1	Resultados da imagem bicromática	90
8.3.2	Resultados da imagem tricromática	91
8.4	Conclusão	93
9	Estereoscópio com Tela Holográfica	95
9.1	Introdução	95
9.2	Descrição	96
9.3	Resultados e imagens obtidas	98
9.4	Conclusão	100
10	Holoprojeção de objetos usando um elemento difrativo e uma fonte linear	101

10.1	Introdução	101
10.2	Descrição	102
10.3	Resultados	103
10.4	Conclusão	103
V	Conclusões	105
11	Conclusões	107
VI	Referências Bibliográficas	109
VII	Apêndices	123
A	Revelador para utilização com PFG-01	125
B	Gravação de telas holográficas simples com laser de diodo	127
B.1	Introdução	127
B.2	Descrição	129
B.3	Resultados e análise	131
B.4	Conclusão	132
C	Sistema de estabilização mecânica de um sistema para gravação de telas holográficas simples com laser de gás	135
C.1	Introdução	135
C.2	Descrição	136
C.3	Resultados e discussão	139
C.4	Conclusão	140
D	Tela Holográfica Simples obtida por partes	143

D.1	Descrição	143
D.2	Resultados	144
D.2.1	Análise	145
D.3	Conclusão	145
E	Programa de traçado de raios para cálculo da distância focal de telas holográficas com extensão de campo vertical	147
F	Outras aplicações das telas holográficas horizontalmente dispersivas	151
F.1	Holoprojetor por lançamento horizontal de vistas	151
F.2	HoloTV de plano único paralelo	153
F.3	Sistema vetorial de criação de holoimagens	155
F.4	Sistema para ampliação de hologramas com luz branca	156
G	Trabalhos publicados e aceitos durante o doutorado	159
G.1	Artigos publicados em revistas	159
G.2	Artigos aceitos para publicação	160
G.3	Artigos arbitrados publicados em anais de congresso	160
G.4	Trabalhos completos publicados em congresso com resumo estendido . .	161
G.5	Principais artigos publicados	162

.

Lista de Figuras

1.1	Folha de rosto das publicações completas de Augustin Fresnel.	6
1.2	Exemplo da convenção adotada para análise da difração de uma estrutura periódica.	8
1.3	Placa zonal binária: as áreas de cada anel, claras e escuras, são iguais. .	10
1.4	Gravação holográfica de uma placa zonal.	11
1.5	Analogia gráfica entre lentes convergentes refrativa (convencional) e difrativa. Além da “quebra” do eixo óptico, a distância focal da lente difrativa depende em proporção direta do comprimento de onda λ	12
1.6	Observador visualizando uma imagem branca com a tela holográfica. .	13
1.7	Gravação de um holograma num filme holográfico, fazendo a interferência de onda objeto O com uma onda referência R.	13
1.8	Reconstrução holográfica: (a) Holograma iluminado pela onda A. (b) Holograma iluminado pela onda de referência conjugada A*.	15
1.9	(a) Foto do holograma, Letra E, de Walter Spierings. (b) Mesma foto girada de 90 graus. A dispersão cromática, agora colocada horizontalmente, mostra a paralaxe horizontal.	17

1.10	Processo de codificação-decodificação por difração: (a) Slide com as 5 fendas que será projetado sobre uma rede de difração; (b) imagem de 5 fendas que chegam a rede de difração em cinco diferentes profundidades; (c) espectro que chega à tela holográfica; (d) imagem visualizada por um observador, onde as fendas estão em diferentes profundidades.	18
1.11	Processo de codificação-decodificação por difração: (a) o espectro projetado sobre a tela holográfica resulta em uma imagem atrás da tela; (b) o espectro resulta em uma imagem na tela; (c) o espectro resulta em uma imagem a frente da tela.	19
1.12	Processo de codificação-decodificação por difração em processo de dupla difração intermediada: (a) utilizando redes de difração; (b) utilizando elementos bidimensionais (CDs ou DVDs).	20
1.13	Formação da imagem em um processo de dupla difração com redes intermediado por uma fenda. Uma banda do espectro, limitado pelos extremos representados na figura, difrata pela primeira rede de difração (R1) e atravessa uma fenda F. O espectro é decodificado pela segunda rede R2 que converge até o ponto imagem I.	20
1.14	Tela de Neblina	22
1.15	Sistema <i>IO2 HelioDisplay</i>	22
1.16	Imagem 2D em tela difusora.	22
1.17	Imagem volumétrica desenhada com laser no ar.	23
1.18	Imagem volumétrica em uma tela giratória.	24
1.19	Imagem 3D produzida pelo sistema da Holografika.	25
2.1	Sistema de projeção formado por duas redes de difração (DG). O projetor (P) projeta a imagem sobre a rede de difração DG1 e a ordem difratada é focalizada por uma lente (L) sobre a segunda rede (DG2). Um observador (O) observa a imagem resultante.	34

2.2	Visão do observador. Campo vertical é limitado pela extensão angular que oferece a lente projetora.	35
2.3	Sistema para projeção de imagens utilizando dois CDs sem a camada refletora.	36
2.4	(a) Uma imagem feita utilizando redes de difração e (b) Uma imagem feita utilizando CDs.	36
2.5	Interferência de duas fontes pontuais.	37
2.6	Figura gerada na interferência de duas fontes pontuais, tela holográfica simples. A distância entre as franjas é da ordem de $1\mu m$	38
2.7	Geometrias generalizadas de (a) gravação e (b) reconstrução	39
2.8	Um projetor monocromático (P) origina um ponto de luz divergente de comprimento de onda λ_2 que converge logo após atravessar a tela holográfica (THS). z_p é a distância de projeção e z_i é a distância de focalização, ambas ortogonais a THS. As coordenadas da fonte pontual de projeção são (x_p, y_p, z_p) e as coordenadas do ponto imagem são (x_i, y_i, z_i)	44
2.9	Iluminação da tela holográfica simples por um ponto de luz branca. . .	45
3.1	(a) A tela holográfica horizontalmente dispersiva sendo iluminada por um feixe divergente de luz branca. R, G e B são as representações das imagens vermelha, verde e azul do difusor. (b) Visão da dispersão cromática feita pela tela no plano horizontal. A imagem feita do difusor para cada λ , de altura a e largura b , aparece disposta lateralmente. Nas telas gravadas buscamos ter a grande e reduzir ao máximo b . Essas dimensões são proporcionais as dimensões do difusor (Figura 5.1)	49
3.2	A tela holográfica verticalmente dispersiva sendo iluminada por um feixe divergente de luz branca originado de um projetor P. R e B são as representações das imagens vermelha e azul do difusor. Na região W ocorre a superposição das imagens do difusor.	50

4.1	Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica simples usando dois feixes diretos. O feixe colimado de um laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M) até chegar a um filtro espacial (SP). Ambos os feixes divergem até chegar ao filme holográfico (HF).	55
4.2	Interferência de duas ondas esféricas em filme holográfico (HF) resultando em uma tela holográfica simples. z_r e z_o são as distâncias transversais da origem dos feixes referência e objeto ao plano de HF. A onda referência é gerada por uma fonte pontual em (x_r, y_r, z_r) e a onda objeto por uma fonte em (x_o, y_o, z_o)	56
4.3	Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica usando um feixe divergente e um feixe convergente. O feixe laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho (M) até chegar a um filtro espacial (SP). O feixe que sai de SP1 diverge até chegar no filme (HF) e o feixe que diverge de SP2 encontra uma lente de Fresnel (FL) que o faz convergir até encontrar HF.	57
4.4	Esquema das distâncias utilizadas para a determinação da distância focal da tela holográfica gravada empregando uma lente de Fresnel. A onda referência converge em (x_r, y_r, z_r) e a onda objeto é gerada por uma fonte em (x_o, y_o, z_o)	58
4.5	Superfície estrutural de uma tela holográfica simples de curta distância focal visualizada com microscópio eletrônico. A seta a direita da figura mostra a distância de um período do elemento.	60
4.6	À esquerda, a imagem de video projetada e à direita a imagem visualizada no sistema de holoTV utilizando uma tela holográfica simples.	61

4.7	Par estéreo obtido com uma tela holográfica simples de curta distância focal com um sistema de holoprojeção com fonte linear. À direita a vista direita e à esquerda a vista esquerda do par estéreo.	62
5.1	Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica horizontalmente dispersiva, usando um feixe direto e um difusor vertical. O feixe colimado de um laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M). O feixe referência atinge o filtro espacial (SP) e o feixe objeto chega a uma lente cilíndrica (CL) originando uma linha que diverge até um difusor (D). Cada ponto iluminado de D ilumina todo o filme holográfico (HF). HF também é iluminada pelo feixe que vem de SP.	64
5.2	Distribuição de luz gerada pelo difusor na posição do filme.	65
5.3	Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica verticalmente dispersiva, usando um feixe direto e um difusor horizontal. O feixe colimado de um laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M). O feixe referência atinge o filtro espacial (SP) e o feixe objeto chega a uma lente cilíndrica (CL) originando uma linha que diverge até um difusor (D). Uma lente esférica divergente (DL) aumenta a divergência do feixe antes de chegar a D. Cada ponto iluminado de D ilumina todo o filme holográfico (HF). HF também é iluminada pelo feixe que vem de SP.	66
5.4	As dimensões do difusor e lentes envolvidas na gravação.	67
7.1	Esquema da montagem do sistema de HoloTV de plano único.	84
7.2	À esquerda a imagem do vídeo projetado no sistema de HoloTV. Ao centro a imagem correspondente a cena da esquerda. À direita outra cena do mesmo vídeo.	85

7.3	À esquerda a imagem vista pelo olho esquerdo e à direita a imagem visualizada com o olho direito. A comparação entre a imagem e o bastão mostra que a distância da imagem é 27 cm a frente da tela.	85
8.1	Fibra fotônica (<i>photonic crystal fibre</i>) utilizada para gerar um ponto bicromático com a Tela holográfica	88
8.2	Espectro produzido pelo feixe de Ti:Sa após passar por uma fibra fotônica e ser difratado por uma rede de difração.	89
8.3	Sistema utilizado para formação de um ponto imagem bicromático à frente da tela. BS é um divisor de feixes.	89
8.4	Sistema de HoloTV de plano único colorido.	90
8.5	Superposição dos pontos vermelho e verde resultando em um ponto amarelo.	91
8.6	Diferença de paralaxe na visão de cada um dos olhos. O ponto de cima corresponde a visão do olho direito e a de baixo a do olho esquerdo. . .	91
8.7	Na primeira linha vemos as imagem gerada por cada um dos projetores individualmente, abaixo tomados dois a dois e finalmente todos juntos, gerando a imagem branca.	92
8.8	Projeção simultânea dos três componentes RGB de uma imagem complexa resultando em uma imagem colorida à frente da tela.	93
9.1	Projeção superposta na tela de dois projetores, cada um gerando um campo de vista diferente na posição do observador.	97
9.2	Par estereo projetado pelos projetores.	98
9.3	(a) A distribuição de luz que chega aos olhos do observador. (b) Uma visão do observador com referências para a identificação de tamanho da imagem visualizada.	98
9.4	Perspectiva esquerda (a) e direita (b) do par estereo que é visualizado por um observador.	99

10.1	Esquema do sistema de holoprojeção utilizando uma tela holográfica simples (THS).	102
10.2	Imagens observadas com o sistema de holoprojeção com fonte linear. Com um objeto de arame (a) e com um mostrador de cristal líquido (b).	103
B.1	Sistema holográfico utilizado para gravar uma tela holográfica simples com laser de diodo.	130
B.2	Foto do sistema holográfico utilizado para gravar uma tela holográfica simples com laser de diodo.	130
B.3	À esquerda, o objeto utilizado para a visualização da imagem e à esquerda a imagem visualizada com a tela holográfica.	131
C.1	Sistema holográfico utilizado para gravar uma tela holográfica simples.	137
C.2	Franjas de interferência analisadas com um detector de onde se concluiu que as instabilidades aconteciam devido a vibrações no chão do laboratório.	138
C.3	O divisor de feixes e um dos filtros espaciais estão fixos a outros elementos ópticos por meio de barras coladas com metacrilato.	139
C.4	As barras coladas sobre um dos espelhos planos; atrás o filme plástico. .	139
D.1	Lente de Fresnel construída por partes.	144
D.2	Esquema simplificado da gravação de uma tela holográfica por partes. EC são dois espelhos planos com controle angular.	145
F.1	Holoprojetor por lente horizontal	152
F.2	Formação da imagem com o holoprojetor.	153
F.3	Imagem visualizada com o holoprojetor por lente horizontal.	153
F.4	HoloTV de plano único paralelo a tela.	154
F.5	Campo de observação das imagens.	155
F.6	(a) Sistema vetorial de criação de holoimagens. (b) Cubo gerado pelo movimento de espelhos atravessando a tela.	155

F.7	Ampliação de hologramas com tela holográfica.	156
-----	---	-----

Lista de Tabelas

4.1	Resultados experimentais na gravação de telas holográficas simples (T.H.S.)	59
4.2	Comparação das distâncias focais teóricas e experimentais nas telas holográficas simples (T.H.S.)	59
5.1	Resultados experimentais na comparação das eficiências de difração em relação a ordem zero de duas telas holográficas com extensão de campo vertical	68
5.2	Melhores eficiências de difração das telas holográficas com extensão de campo vertical	68
5.3	Resultados das distâncias focais das telas holográficas com extensão de campo vertical	69
5.4	Comparação das telas obtidas com os métodos descritos nesta dissertação com uma tela obtida com laser pulsado	70
6.1	Características do Filme Holográfico Agfa-Gevaert 8E75 HD	75
6.2	Revelador para filme holográfico Agfa-Gevaert 8E75 HD	76
6.3	Branqueador para filme holográfico Agfa-Gevaert 8E75 HD	77
A.1	Revelador para filme holográfico PFG-01	125

.

Parte I

Introdução

.

Capítulo 1

Introdução

O termo *tela holográfica* é usado muitas vezes para designar telas semitransparentes que são usadas para projeção de imagens que vistas, apresentam aspecto fantasmagórico. Estas telas não são necessariamente construídas por holografia e também podem não ser capazes de produzir imagens tridimensionais.

A tela holográfica referida nesta tese é um elemento óptico difrativo (em inglês, DOE) [1] gerado pela interferência de dois feixes monocromáticos de maneira a redistribuir apropriadamente a luz que recebe para um observador com o objetivo de visualização de imagens 3D sem óculos e com paralaxe.

Sem haver conhecido a tela holográfica feita para uso com luz monocromática [2, 3], J. J. Lunazzi teve a ideia da primeira tela holográfica para luz branca através de um holograma de Walter Spierings, “Letra E”, onde a profundidade resultava espectralmente codificada e através de um holograma Benton [4] simples criado por um artista plástico chamado Dan Schweitzer [5] antes de 1984, como decodificador visual. O holograma de Schweitzer era criado a partir do registro de um difusor plano e o resultado eram cores puras que mudavam conforme a mudança do ponto de vista vertical de um observador. Steve McGrew tornou este holograma popular produzindo massivamente hologramas estampados [6]. A primeira tela holográfica nada mais era que um desses elementos

girado de noventa graus.

Esta tela foi mostrada a imprensa em 1988 e em congresso da especialidade nos EUA em 1989 [7] e logo depois foi patenteada [8]. A capacidade de produzir imagens fora do plano da tela se deve ao fato de que o registro fotográfico do espectro de uma imagem após passar por uma rede de difração, guarda uma memória da profundidade. A tela holográfica é a decodificadora desta memória. O processo de codificação-decodificação da profundidade de uma imagem por dupla difração foi citado pela primeira vez em 1990 [9], e dois anos depois é publicada sua primeira descrição [10].

Uma das dificuldades na obtenção das telas holográficas é conseguir estabilidade na gravação, já que as dimensões envolvidas são muito superiores às típicas, de poucos centímetros, e os produtos químicos utilizados para este fim, como o Varsol por exemplo, são de alto risco para a saúde [11, 12]. Para contornar esse problema foram construídas telas utilizando laser pulsado [13, 14], que apesar do grande tamanho, possuíam baixa eficiência de difração.

O processo de fabricação de telas holográficas foi poucas vezes publicado e, possivelmente por ter boas possibilidades de aplicações comerciais, por vezes repatenteado [15, 16].

Por outro lado o método de fabricação de lentes difrativas, ou telas holográficas simples, que poderiam ser passíveis de aplicação com luz branca, vem sendo explorado atualmente devido às diversas aplicações que esses elementos podem ter [17, 18, 19]. Utilizando um laser pulsado de femtossegundos foi possível obter lentes de pequena abertura com boa eficiência de difração [20, 21].

Nesta tese descrevemos métodos distintos de obtenção de telas holográficas para aplicações em projeções com luz branca, analisamos e comparamos os resultados com telas obtidas previamente, assim como descrevemos suas aplicações.

1.1 Difração

O fenômeno responsável pela formação de imagens em sistemas que utilizam a tela holográfica é a *difração*.

A difração ocorre sempre que uma frente de onda fica limitada por um obstáculo ou por uma abertura de qualquer tipo. A intensidade da luz em qualquer ponto do espaço pode ser calculada tomando-se cada ponto da frente de onda como uma fonte puntiforme e calculando-se a configuração de interferência que daí resulta (Princípio de Huygens) [22].

As idéias de Huygens e Young foram combinadas em 1818 por Augustin Jean Fresnel. Fresnel foi calculou a distribuição de luz em espectros de difração com excelente precisão.

Na apresentação de Fresnel de seu artigo para um comitê premiador da Academia Francesa de Ciências, sua teoria foi fortemente criticada pelo grande matemático francês S. Poisson, um membro do comitê. Poisson mostrou o absurdo da teoria mostrando que ela previa uma mancha clara no centro da sombra de um disco opaco. F. Arago executou um experimento e encontrou essa mancha. Fresnel ganhou o prêmio, e desde então o efeito tem sido conhecido como a Mancha de Poisson. Tendo lido algumas das apresentações de Fresnel à Academia Francesa de Ciências (Figura 1.1), J. J. Lunazzi suspeita que Arago tenha usado raios de Sol e um filtro para aumentar a pontualidade e monocromaticidade da luz e perceber a mancha criada pelo disco opaco.

A difração foi depois estudada no caso de fendas e aberturas circulares, até se chegar às estruturas periódicas que chamamos de redes, sendo redes simples às de linhas retas, paralelas e equidistantes. Outro tipo de rede, mais complexa, são as de linhas circulares concêntricas, por exemplo. Elas podem ser feitas para funcionar tanto por transmissão como por reflexão.

Ao criar a holografia, Gabor [23] associou a figura de interferência de duas ondas, uma simples e outra de tipo geral, à onda gerada pela difração dessa mesma figura demonstrando o princípio de reconstrução de ondas que lhe rendeu o prêmio Nobel em

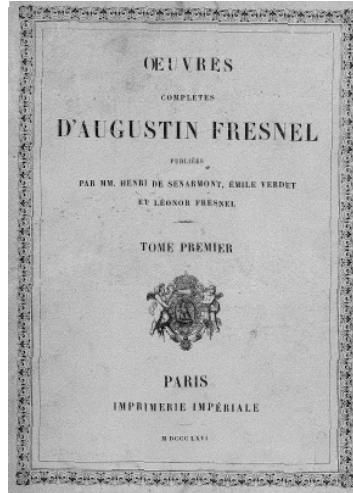


Figura 1.1: Folha de rosto das publicações completas de Augustin Fresnel.

1972. Um holograma funciona por difração e isso guarda semelhança com este trabalho, porque as telas holográficas funcionam por difração.

A teoria de difração, inicialmente baseada na geração de ondas secundárias segundo o modelo de Huyguens, foi aplicada com sucesso por Fresnel fazendo engenhosas somatórias de componentes de amplitude e fase em cada direção, e desenvolvida posteriormente a partir das equações de Maxwell.

Sommerfeld, que definiu convenientemente a difração como *qualquer desvio dos raios de luz de caminhos retilíneos que não podem ser interpretados por reflexão ou refração* [24], Kirchoff, Rayleigh e outros obtiveram um equacionamento correto mas tiveram de se limitar a componentes escalares. A teoria vetorial tem desenvolvimento mais recente porém, limitada a problemas mais simples.

Na prática, uma limitação maior existe porque as soluções que se consegue obter necessitam de ordinário assumir uma aproximação de ângulo pequeno com respeito a linha de propagação, a chamada teoria paraxial. Essa limitação não é devidamente ressaltada nos livros texto, assim como o fato de que, mesmo com a aproximação paraxial, pode-se ficar muito difícil ou até impossível se obter a solução analítica. É nesses casos onde é empregado o traçado de raios [25], que considera exclusivamente a direção principal de desvio de energia por uma estrutura aproximadamente periódica, sem sequer considerar

a fase como nos cálculos de Fresnel. Esta ferramenta resulta um auxiliar inestimável e que pode comprovar, pelo casamento com os resultados experimentais, o funcionamento do processo de difração.

1.1.1 Traçado de raios: difração por uma estrutura periódica

Em uma tela holográfica, apesar de sua estrutura não possuir frequência espacial constante, podemos considerá-la dessa forma desde que a parte em questão seja suficientemente pequena. Consideramos pequena, por exemplo, uma região de 3 mm de uma tela holográfica gravada a 45 graus onde suas distâncias de gravação são maiores que 1 m. Para mais informações sobre a gravação, ver Parte III desta dissertação.

A direção dos raios difratados de uma onda qualquer, indicada pela normal da superfície de uma frente de onda, incidente em uma estrutura periódica, pode ser calculada utilizando a equação das redes de difração [26]

$$\text{sen}\theta_i - \text{sen}\theta_d = m\lambda\nu \quad (1.1)$$

onde θ_i e θ_d são os ângulos de incidência e difração respectivamente, m é um número inteiro e é chamado de ordem de difração e ν é a frequência espacial da estrutura periódica.

A rede de difração nada mais é que uma estrutura periódica capaz de difratar uma certa onda incidente para direções indicadas pela equação 1.1. Vale ressaltar que para que ocorra difração por uma estrutura periódica, as dimensões envolvidas da estrutura devem ser da ordem de grandeza do comprimento de onda da onda envolvida.

Para trabalhar com a equação 1.1, é necessário definir uma *regra de sinais* para os ângulos e para a ordem de difração. A convenção usada nessa tese segue a definida por [27]. Esta convenção é explicitada abaixo:

- O ponto onde o raio toca o plano da estrutura periódica é a origem do plano

coordenado.

- Os ângulos de incidência e difração são tomados a partir da normal, como de costume.
- Os ângulos que encontram-se em quadrantes pares são negativos, enquanto que os encontrados em quadrantes ímpares são positivos.
- A ordem de difração é considerada positiva quando o raio é desviado para cima em relação a ordem zero (raio que não é desviado), e negativa em caso contrário.

Vale lembrar que o seno de um ângulo negativo é o negativo do seno do módulo do ângulo, pois o seno é uma função ímpar.

A figura 1.2 mostra um exemplo da convenção. Nesse caso os ângulos de incidência e difração são negativos e a ordem de difração é positiva.

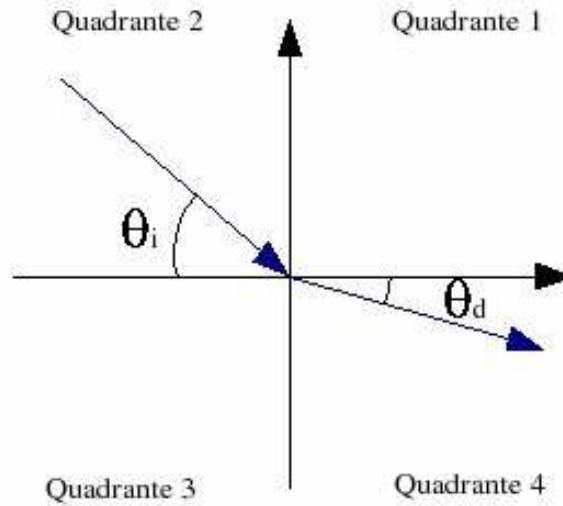


Figura 1.2: Exemplo da convenção adotada para análise da difração de uma estrutura periódica.

A equação resultante para esse caso seria:

$$- \operatorname{sen}|\theta_i| + \operatorname{sen}|\theta_d| = +|m|\lambda\nu \quad (1.2)$$

1.2 Lentes Difrativas

Lentes difrativas são elementos ópticos geralmente usados para focalizar luz monocromática. Uma lente difrativa consiste em uma série de anéis ou de zonas de largura decrescente.

As *placas zonais* são lentes difrativas que focalizam luz no eixo óptico da lente.

1.2.1 Placas Zonais ou Lentes Difrativas em eixo

Uma placa zonal [28, 29] é um elemento usado para focalizar luz. Diferente das lentes convencionais, a placa zonal usa a difração ao invés da refração para desviar a luz, por isso ela também é conhecida por lente difrativa em eixo. Criada por Augustin-Jean Fresnel, também é chamada de Placa Zonal de Fresnel em sua honra. A capacidade de focalização da placa zonal é uma extensão do fenômeno da mancha de Arago causada pela difração de um disco opaco.

Uma placa zonal consiste de um conjunto de anéis simétricos radiais, conhecidos como *zonas de Fresnel*, os quais se alternam entre regiões opacas e transparentes. A luz que atinge a placa zonal difratará nas bordas das zonas opacas. A distância entre as zonas pode ser escolhida de maneira a possibilitar a focalização à distância desejada. Placas zonais produzem padrões de difração equivalentes, não importando se o disco central é opaco ou transparente, desde que também as outras zonas sigam esta alternância. A luz se encontra em fase a distância f , como mostra a Figura 1.3.

Uma placa zonal pode ser holograficamente obtida gravando um holograma elementar de Gabor [30], ou seja, registrando em um filme holográfico o padrão de interferência de duas fontes pontuais. Esta placa zonal é chamada de *Placa Zonal de Gabor*, em inglês GZP. Uma fonte pontual S a distância v do plano do filme holográfico ilumina um centro de espalhamento P que está a distância u do mesmo plano, como pode ser visto na Figura 1.4.

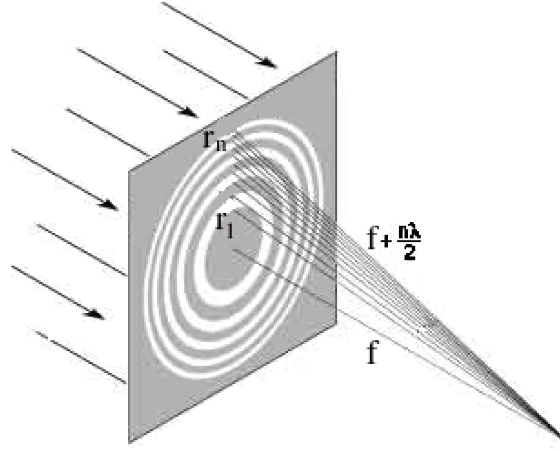


Figura 1.3: Placa zonal binária: as áreas de cada anel, claras e escuras, são iguais.

Quando a diferença de caminho óptico Δl entre a fonte pontual e o centro espalhador for igual a $n\lambda$ temos uma região de máximo brilho [30]. A distância x_n do centro da placa zonal a cada uma destas regiões é dada pela equação 1.3. Esta expressão assume aproximação paraxial.

$$x_n = \sqrt{2n\lambda f} \quad (1.3)$$

onde n é um inteiro, λ é o comprimento de onda de gravação e f é definido pela equação 1.4, onde u e v são as distâncias das fontes pontuais ao filme de gravação como pode ser visto na figura 1.4.

$$f = \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{v} \right)^{-1} \quad (1.4)$$

Uso de lentes difrativas em eixo como telas holográficas

As placas zonais de Gabor descritas na seção 1.2.1 podem ser usadas como telas holográficas. Seu funcionamento é análogo ao das *telas holográficas simples* descritas no Capítulo 2 com um sério inconveniente: como as placas zonais são construídas por duas

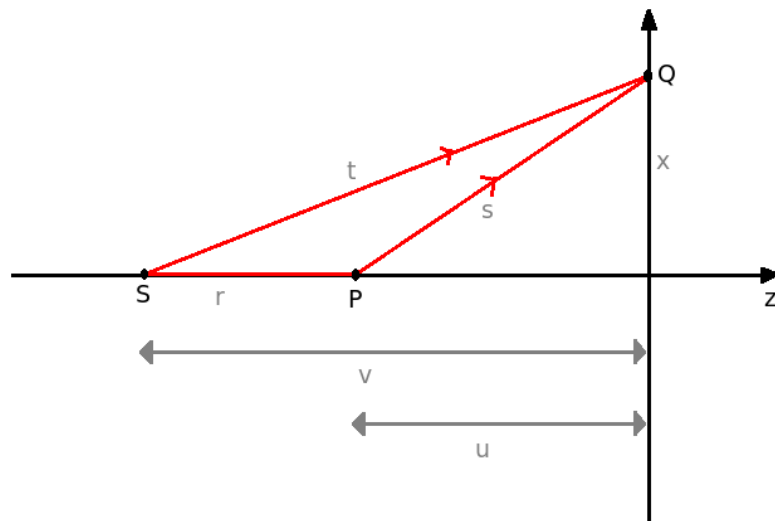


Figura 1.4: Gravação holográfica de uma placa zonal.

fontes pontuais no eixo óptico, quando projetamos uma imagem sobre ela, temos como parasita a ordem zero de difração da placa.

1.2.2 Comparação entre as Lentes Difrativas e Refrativas

Uma lente difrativa, analogamente a uma tela holográfica simples (Capítulo 2), tem comportamento semelhante ao de uma lente convencional refrativa, com a diferença de que a distância focal depende mais fortemente do comprimento de onda e de que não é difícil fazer com que o eixo óptico do objeto não seja o mesmo que o da imagem. Esta analogia está ilustrada na Figura 1.5.

No caso de um objeto de luz branca projetado na lente difrativa, vemos que na posição do foco de cada cor o observador verá o objeto naquela cor correspondente. A Figura 1.6 mostra uma projeção em luz branca sobre a tela, com um dos olhos o observador vê a imagem em vermelho e com o outro olho aquela imagem em verde.

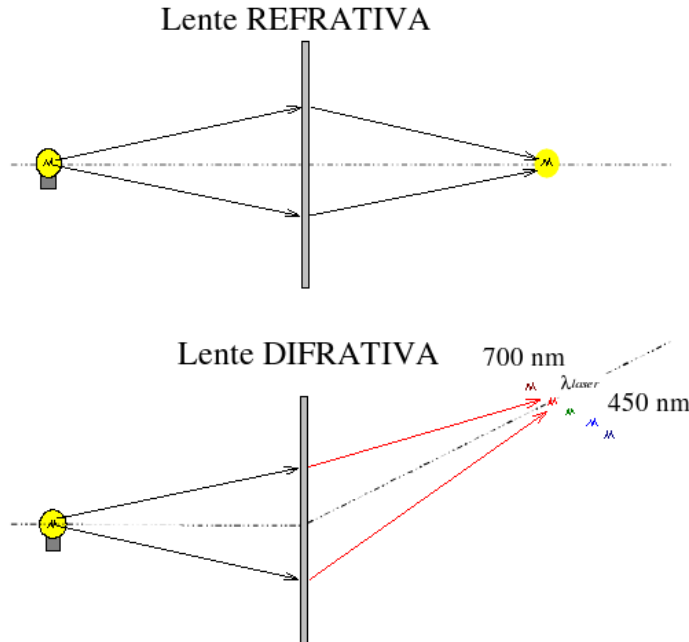


Figura 1.5: Analogia gráfica entre lentes convergentes refrativa (convencional) e difrativa. Além da “quebra” do eixo óptico, a distância focal da lente difrativa depende em proporção direta do comprimento de onda λ .

1.3 Holografia e Holoimagens

1.3.1 Holografia e a reconstrução de uma frente de onda

Em 1948, Gabor sugeriu uma forma que permite registrar um objeto permanentemente em uma placa fotográfica [23]. Este sistema consiste em registrar as ondas que saem dos distintos pontos de um objeto de tal modo que no elemento de registro fique gravado a fase e a amplitude da onda espalhada pelo objeto real iluminado com luz coerente [31]. Da fase, o que interessa ao observador é a variação transversal de seu valor dada pela inclinação do raio. Como o olho não vê a fase absoluta, podemos dizer que a holografia é a fotografia que registra a inclinação dos raios [32, 33]. O elemento onde ficaram gravadas essas informações (amplitude e fase) é chamado de *holograma*.

O processo de reconstrução de uma frente de onda[22] ocorre em duas etapas: a gravação, onde se registra a informação, e a reconstrução. Na gravação, como as ondas em questão são coerentes, necessitamos guardar as informações de amplitude e fase,

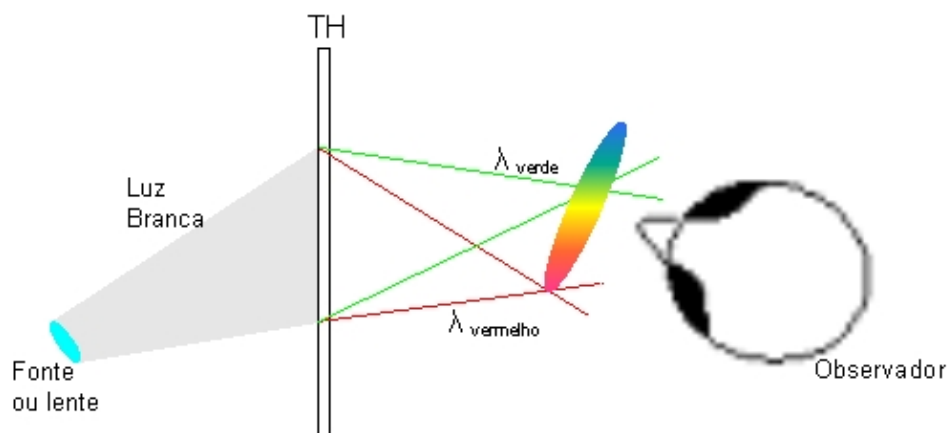


Figura 1.6: Observador visualizando uma imagem branca com a tela holográfica.

entretanto os meios de registros disponíveis respondem a intensidades de luz, assim é necessário que a informação de fase seja convertida de alguma maneira em amplitude. Para isso introduzimos uma frente de onda chamada de *frente de onda de referência*. Na Figura 1.7 representamos a gravação do padrão de interferência das duas frentes de onda, a objeto (que buscamos reconstruir) e a referência.

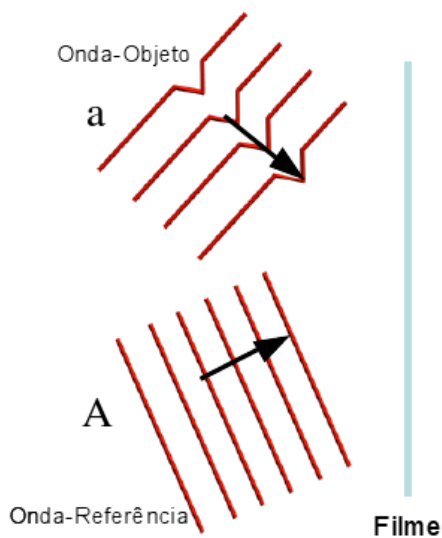


Figura 1.7: Gravação de um holograma num filme holográfico, fazendo a interferência de onda objeto O com uma onda referência R.

Se a onda objeto for

$$\mathbf{a}(x, y) = a(x, y)e^{-j\phi(x, y)} \quad (1.5)$$

e a onda referência for dada por

$$\mathbf{A}(x, y) = A(x, y)e^{-j\psi(x, y)} \quad (1.6)$$

então a intensidade da soma das duas (eq.1.5 e eq.1.6) será

$$I(x, y) = \mathbf{A}\mathbf{A}^* + \mathbf{A}\mathbf{a}^* + \mathbf{a}\mathbf{A}^* + \mathbf{a}\mathbf{a}^* \quad (1.7)$$

$$= |\mathbf{A}(x, y)|^2 + |\mathbf{a}(x, y)|^2 + 2A(x, y)a(x, y)\cos[\psi(x, y) - \phi(x, y)] \quad (1.8)$$

A chave que explica o processo é o terceiro termo da expressão da intensidade 1.8, que tem a informação da diferença de fase das ondas. Considerando que a intensidade $|A|^2$ do feixe referência é uniforme pela superfície de gravação, a amplitude de transmitância do filme gravado e revelado será

$$\mathbf{t}_f(x, y) = \mathbf{t}_b + \beta(\mathbf{A}\mathbf{a}^* + \mathbf{a}\mathbf{A}^* + \mathbf{a}\mathbf{a}^*) \quad (1.9)$$

onde $\mathbf{t}_b$ é uma transmitância uniforme estabelecida pelo referência e β é uma constante que está relacionada com as características do filme.

Se iluminarmos esta transparência (eq. 1.9) com uma onda de reconstrução $\mathbf{B}(x, y)$ obtemos

$$\mathbf{B}(x, y)\mathbf{t}_f(x, y) = \mathbf{t}_b\mathbf{B} + \beta\mathbf{a}\mathbf{a}^*\mathbf{B} + \beta\mathbf{A}^*\mathbf{B}\mathbf{a} + \beta\mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{a}^* \quad (1.10)$$

$$\mathbf{B}(x, y)\mathbf{t}_f(x, y) = \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 + \mathbf{U}_3 + \mathbf{U}_4 \quad (1.11)$$

Note que se a onda $\mathbf{B}$ é uma réplica exata da onda referência $\mathbf{A}$, então o terceiro termo torna-se

$$\mathbf{U}_3(x, y) = \beta \mathbf{A}^* \mathbf{A} \mathbf{a}(x, y) = \beta |\mathbf{A}|^2 \mathbf{a}(x, y) \quad (1.12)$$

Relembrando que assumimos que $\mathbf{A}$ possui uma intensidade uniforme pelo filme, obtemos uma réplica exata da onda objeto a menos de um fator constante, como podemos ver na Figura 1.8(a).

Escolhendo $\mathbf{B}$ como sendo o conjugado da onda referência, isto é, $\mathbf{A}^*$, então a onda $\mathbf{U}_4$ torna-se

$$\mathbf{U}_4(x, y) = \beta \mathbf{A}^* \mathbf{A} \mathbf{a}^*(x, y) = \beta |\mathbf{A}|^2 \mathbf{a}^*(x, y) \quad (1.13)$$

está é a imagem conjugada do objeto, representada na Figura 1.8(b).

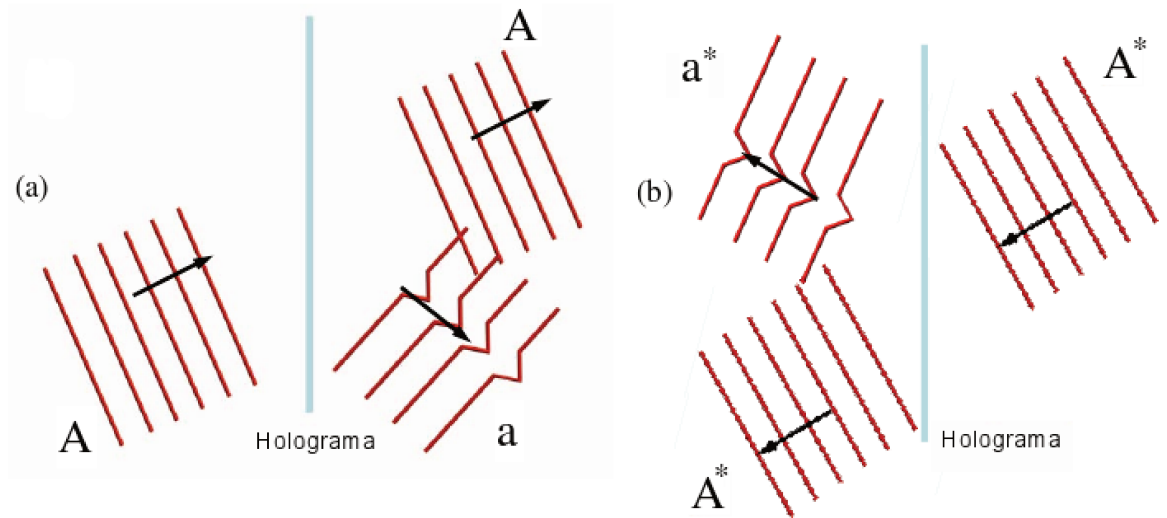


Figura 1.8: Reconstrução holográfica: (a) Holograma iluminado pela onda $\mathbf{A}$. (b) Holograma iluminado pela onda de referência conjugada $\mathbf{A}^*$.

A distribuição de intensidade gravada no holograma não se parece com o objeto, mas quando ele é iluminado adequadamente saem ondas com iguais propriedades de amplitude e fase, como se essas ondas estivessem saindo do objeto real. Observando o

holograma iluminado se vê o objeto como se ele estivesse realmente ali. A holografia inspirou numerosas pesquisas no campo das imagens e da óptica coerente. Tentativas de se obter o mesmo resultado sem precisar do feixe de referência ou de poder registrar pela luz branca não foram bem sucedidas até hoje, mas para o segundo caso temos uma proposta interessante [34]. Por outro lado, tem-se conseguido calcular a amplitude e fase da onda por meio da análise da intensidade da luz difratada paraxialmente pelo objeto, o que tem aplicações interessantes na obtenção de imagens por meio de raios X [35].

1.3.2 Holoimagem, uma imagem *holo* sem o registro

Como vimos na seção anterior, um holograma é o registro em filme holográfico utilizando um fonte de luz coerente de um objeto. *Holo* é um radical que vem do grego (holos) e significa “todo”.

Definimos uma *holoimagem* como uma imagem volumétrica produzida com a utilização de uma tela holográfica. Ela possui paralaxe contínua mas, diferente de um holograma, onde a imagem está registrada permanentemente no filme, acontece sem o registro no filme holográfico. Uma holoimagem é produzida através de uma projeção sobre a tela. Todas as imagens produzidas com os sistemas descritos na Parte IV desta tese são **holoimagens**, com a exceção do estereoscópio com tela holográfica.

1.4 Processo de codificação e decodificação por difração

A holoprojeção sobre tela holográfica consiste em uma codificação difrativa lançada por projeção em uma tela holográfica.

A *codificação-decodificação difrativa* [9] foi descoberta após a ideia de Silvia Lunazzi, uma criança naquele então, de observar as fotos dos hologramas do catálogo “Licht

Blicke”[36] com óculos bicolor¹. Após muito observar, seu pai J. J. Lunazzi percebeu que a foto do holograma “Letra E” (Figura 1.9) de Walter Spierings, conservava certa profundidade. Esta propriedade acontecia devido ao espectro presente na fotografia daquele holograma.

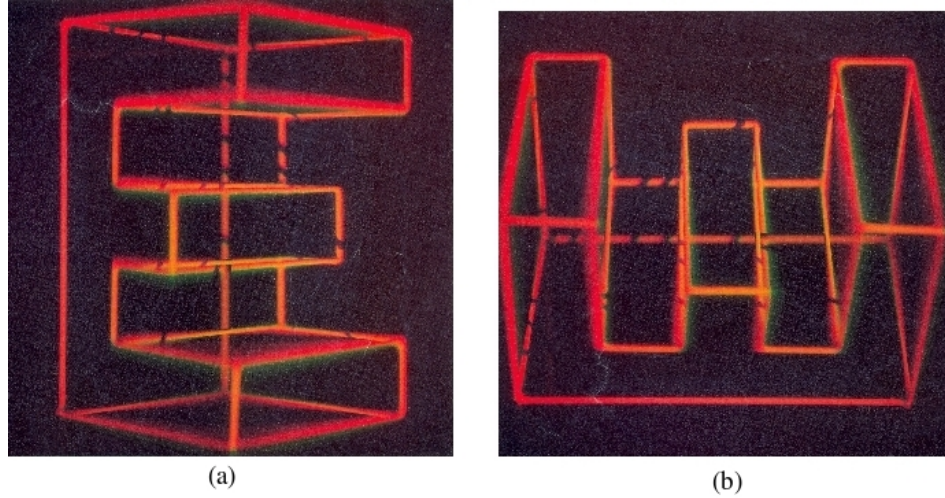


Figura 1.9: (a) Foto do holograma, Letra E, de Walter Spierings. (b) Mesma foto girada de 90 graus. A dispersão cromática, agora colocada horizontalmente, mostra a paralaxe horizontal.

A imagem difratada é codificada por uma rede de difração da seguinte forma: *a largura do espectro de cada ponto da imagem projetada sobre a rede tem a informação da profundidade em que o ponto estava* [10]. Assim a foto do holograma “Letra E”, que tinha registrado o espectro, guardou a informação da profundidade do holograma real.

A imagem de cinco fendas está representada na Figura 1.10(a) e (b), cada uma está a uma diferente distância de uma rede de difração. Quando essa imagem passa pela rede de difração e é projetada sobre a tela por uma lente, temos uma largura espectral diferente para cada uma, como representado na Figura 1.10(c). Essa codificação cromática é decodificada pela tela difrativa como aparece na Figura 1.10(d), que é como a veria o observador [9].

¹Óculos utilizados para a visualização de anaglifos, formado por dois filtros cromáticos, um vermelho e outro verde ou azul

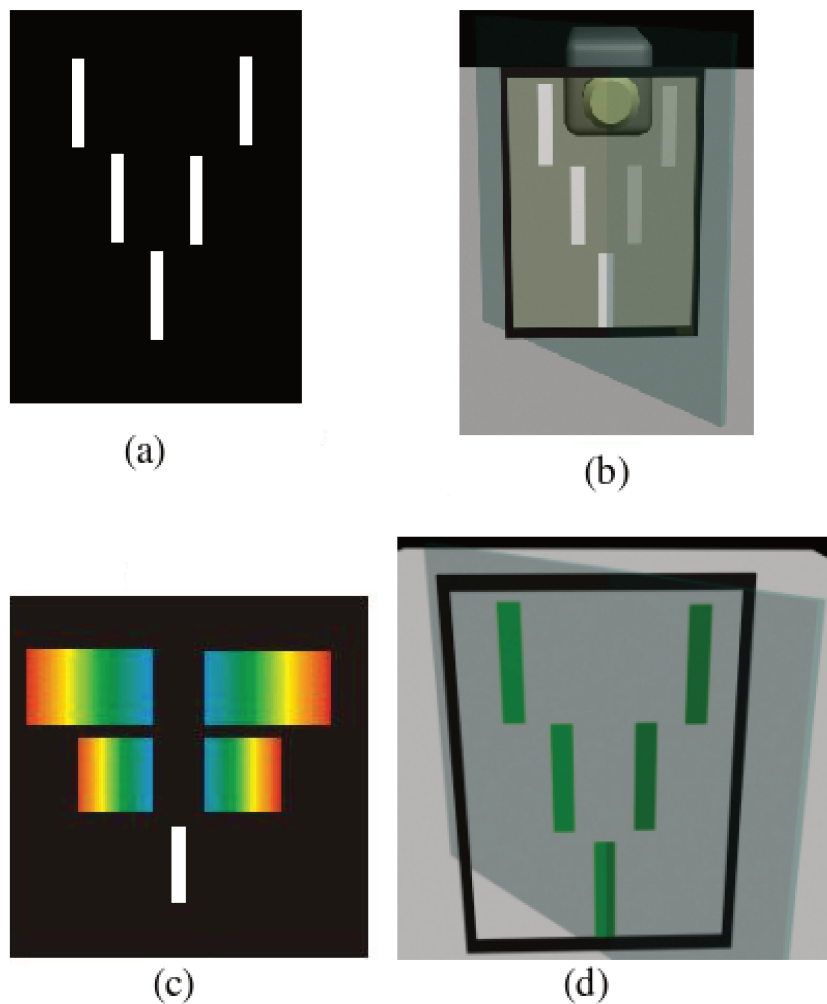


Figura 1.10: Processo de codificação-decodificação por difração: (a) Slide com as 5 fendas que será projetado sobre uma rede de difração; (b) imagem de 5 fendas que chegam a rede de difração em cinco diferentes profundidades; (c) espectro que chega à tela holográfica; (d) imagem visualizada por um observador, onde as fendas estão em diferentes profundidades.

Em sistemas onde a codificação e decodificação estão presentes, como a HoloTV (Capítulos 7 e 8), vemos que a posição onde a imagem será formada depende de como o espectro chega à tela, como pode ser visto na Figura 1.11. Uma lente objetiva capta o espectro gerado pela rede de difração e focaliza sobre a tela holográfica.

Aproximando a tela (em uma pequena parte) por uma rede e a lente por uma fenda temos simetria [37]. A lente dará um fator de aumento que é o mesmo para a profundidade da imagem. Observa-se que o aumento transversal é igual ao longitudinal,

como em um holograma. Isto quer dizer que para uma pequena distância da imagem focalizada, a rede gera uma imagem m vezes mais distante da tela, onde m é o aumento da lente.

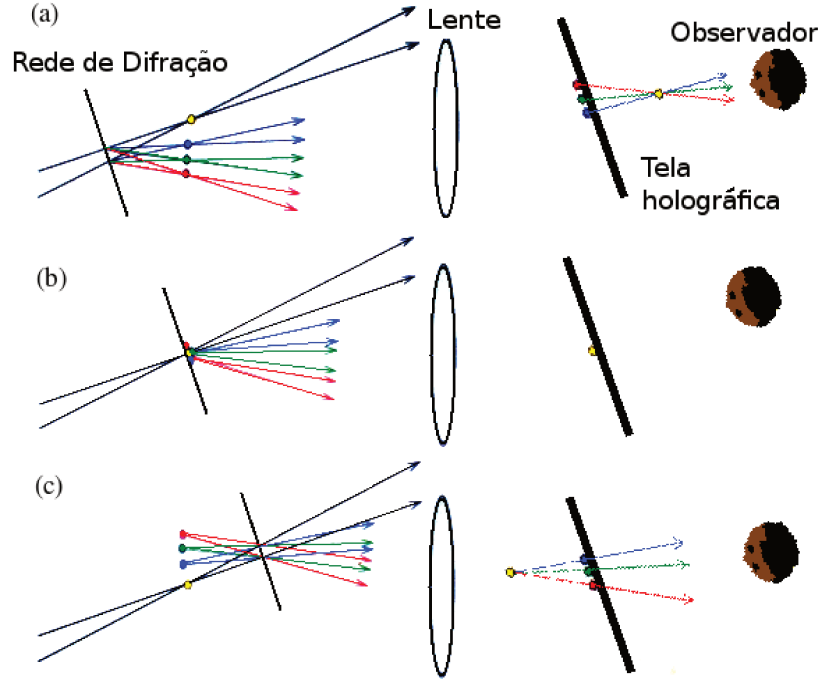


Figura 1.11: Processo de codificação-decodificação por difração: (a) o espectro projetado sobre a tela holográfica resulta em uma imagem atrás da tela; (b) o espectro resulta em uma imagem na tela; (c) o espectro resulta em uma imagem a frente da tela.

O processo de *codificação-decodificação difrativa* também acontece em sistemas de dupla difração intermediada. Na Figura 1.12(a) temos a formação da imagem em um sistema de dupla difração com redes de difração intermediadas por uma fenda [37] e na Figura 1.12(b) um sistema de dupla difração com *compact discs* (CDs ou DVDs) intermediados por um orifício [38, 39]. O esquema de raios da Figura 1.12(a) e da 1.13 é o mesmo em cada plano da Figura 1.12(b) onde temos simetria respeito a um eixo. Em ambos casos a posição do objeto é codificada pelo primeiro elemento, selecionado pelo elemento intermediário (fenda ou orifício) e decodificado pelo segundo. Um pequeno orifício, como o utilizado em [38], equivale ao centro de uma lente projetora, como a

utilizada na Figura 1.11. A Figura 1.13 mostra a semelhança do processo de formação da imagem em um sistema de dupla difração intermediado por uma fenda com o processo utilizando uma tela holográfica e uma lente objetiva (Figura 1.11).

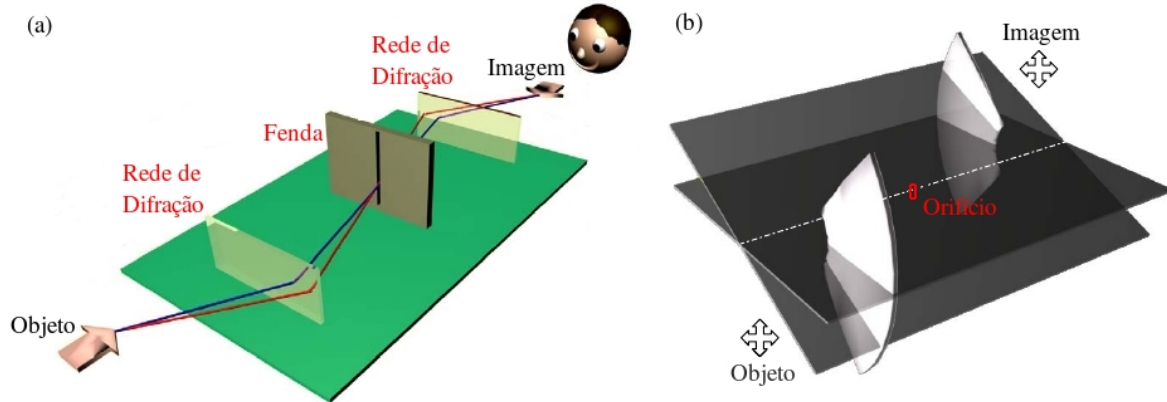


Figura 1.12: Processo de codificação-decodificação por difração em processo de dupla difração intermediada: (a) utilizando redes de difração; (b) utilizando elementos bidimensionais (CDs ou DVDs).

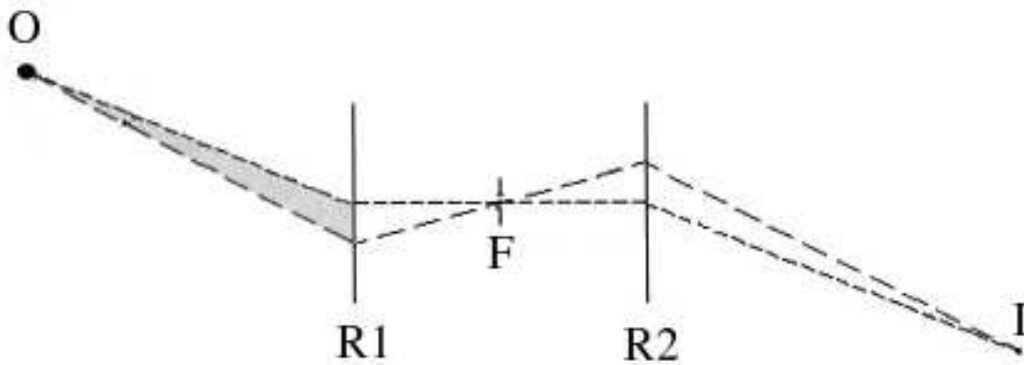


Figura 1.13: Formação da imagem em um processo de dupla difração com redes intermediado por uma fenda. Uma banda do espectro, limitado pelos extremos representados na figura, difrata pela primeira rede de difração (R1) e atravessa uma fenda F. O espectro é decodificado pela segunda rede R2 que converge até o ponto imagem I.

1.5 Sistemas atuais de imagens que se assemelham às holográficas

Além dos sistemas de imagens apresentados nessa tese, muitos outros estão sendo desenvolvidos atualmente. A maioria dos que serão mostrados nessa seção são protótipos. Os produtos finais estão protegidos por patentes e relacionados a atividades comerciais; seus produtores não revelam detalhes de seu funcionamento.

1.5.1 Sistemas Pseudo 3D

Abaixo descrevemos sistemas de imagem que, por ingenuidade do usuário ou por má fé dos fabricantes, são considerados como sistemas de imagens tridimensionais.

As Telas de Neblina (em inglês, Fogscreen) [40] (Figura 1.14) possibilitam imagens bidimensionais com baixa resolução, e que apresentam a vantagem de uma interatividade com a imagem, pois o observador pode, por exemplo, atravessar a imagem com sua mão. Ela funciona com um gerador de neblina e um projetor de vídeo. O gerador produz uma neblina densa e plana que é a tela do projetor de vídeo. A tela de neblina é seca, apesar de ser feito de água, sem nenhum aditivo químico. Ela é fabricada na Finlândia, ganhou vários prêmios na Europa e está à venda em alguns países europeus e nos EUA.

Outro sistema parecido a tela de neblina, chamado *IO2 HelioDisplay* consiste na projeção em gás lançado pelo equipamento [41] (Figura 1.15).

Telas difusoras 2D semi-transparentes (Figura 1.16) que apresentam imagens de alta resolução já são vendidas e alugadas no Brasil [42]. Essas telas são incapazes de produzir imagens 3D mas mostram resultados interessantes porque aproveitam sua transparência em regiões não iluminadas. A *HoloPro* [43] é uma tela difusora construída por holografia para projeção 2D.



Figura 1.14: Tela de Neblina

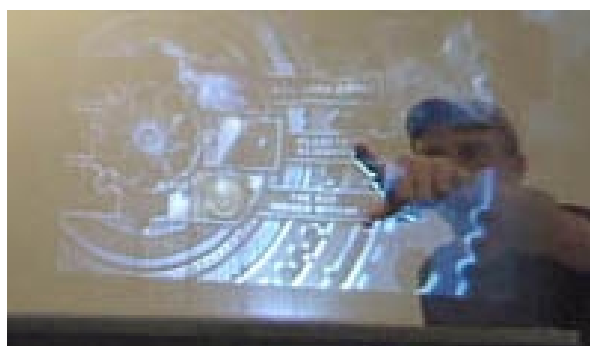


Figura 1.15: Sistema *IO2 HelioDisplay*



Figura 1.16: Imagem 2D em tela difusora.

1.5.2 Sistemas de imagens 3D

Mostramos abaixo sistemas que apresentam imagens realmente 3D, mesmo sem paralaxe contínua, como nos sistemas estereoscópicos.

Sistemas que utilizam barreira de paralaxe permitem a visualização de imagens tridimensionais sem a necessidade de óculos. Colocado a frente de uma tela LCD, estas barreiras consistem em uma série de fendas de alta precisão que permitem que cada olho veja um conjunto diferente de pixels, criando a sensação de relevo por estereoscopia. A desvantagem desta tecnologia é a de que o observador deve estar em uma posição pré-determinada para ver a tridimensionalidade da cena [44].

Sistemas que fazem imagens tridimensionais também estão sendo desenvolvidos com a utilização de lasers de alta potência. Esses lasers convergem em uma pequena região ionizando o ar. A Figura 1.17 mostra uma imagem de pontos produzidos por um laser de alta potência.

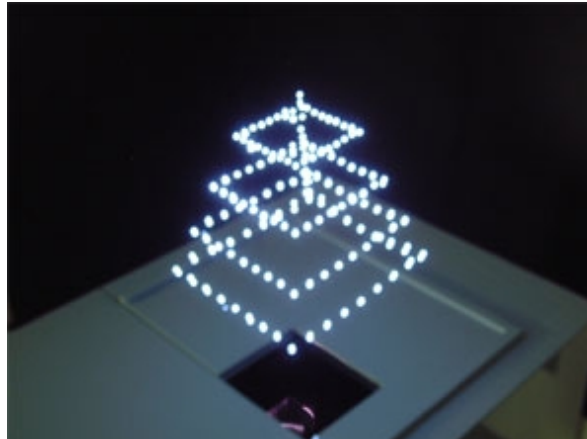


Figura 1.17: Imagem volumétrica desenhada com laser no ar.

Um sistema que consiste em uma Tela giratória *OmniView(R)* de alta velocidade (Figura 1.18), desenvolvida pela Texas Instruments, hoje é comercializada como IDG. Este sistema apresenta uma tela que roda em altíssima velocidade.

Um sistema de visões múltiplas tridimensional foi desenvolvido por Jung-Young Son e colaboradores [45]. O sistema é composto por três projetores, cada um em um

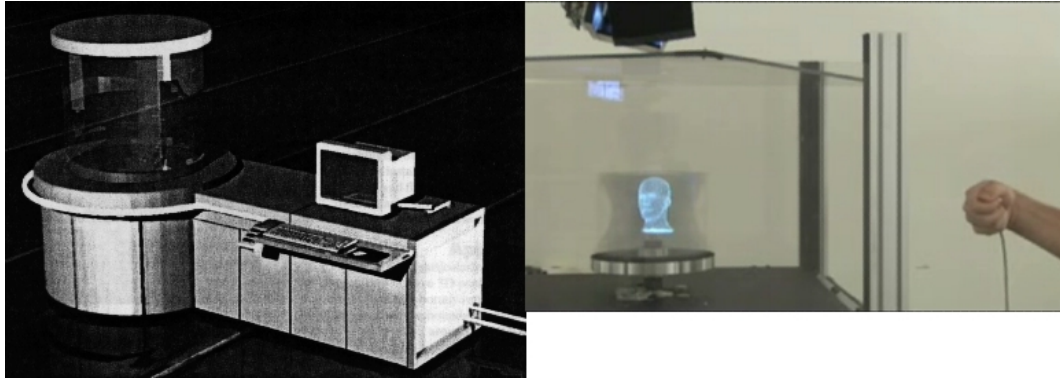


Figura 1.18: Imagem volumétrica em uma tela giratória.

dos componentes tricrômicos. Uma fenda seleciona cada um dos oito pontos de vista lançados pelo projetor. Esta projeção ocorre sobre um tipo de tela holográfica gravada para ser usada por reflexão. Esta tela é formada por três telas que, por efeito Bragg, refletirá cada uma, um dos componentes tricrômicos (RGB). Assim na superposição das três a imagem torna-se colorida. Como a tela é gravada pela interferência do feixe refletido por um espelho côncavo e um feixe colimado, o campo vertical para observadores próximos a tela é pequeno.

A *Holografika* [46] produz um sistema de visualização de imagens tridimensionais de qualidade (Figura 1.19), entretanto o sistema é extremamente caro e apenas reproduz imagens computadorizadas de objetos simples. O sistema é composto de um conjunto de módulos ópticos alinhados que projetam feixes de luz sobre uma tela holográfica [47]. A tela holográfica em questão nada mais é que um difusor com pequeno ângulo, feito por refração ou difração. Assim a tela mantém o ângulo de projeção enviado por cada um dos módulos, mas sendo o ângulo de difusão da tela igual à distância angular entre os módulos, temos como resultado uma paralaxe quase-contínua para os observadores.

Outro sistema patenteado [48] consiste em um espelho com distância focal variável controlada e sincronizada com um monitor que projeta imagens de fatias sobre ele.

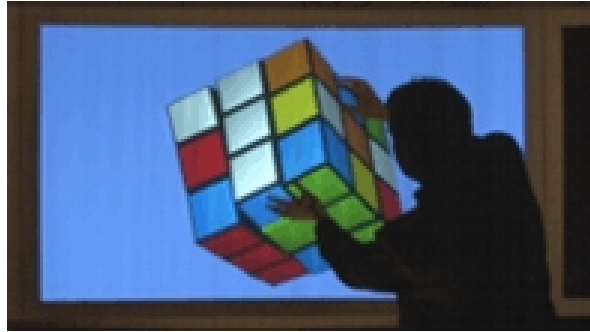


Figura 1.19: Imagem 3D produzida pelo sistema da Holografika.

1.6 Motivação para a construção de Telas Holográficas e suas aplicações

Analisando os sistemas apresentados na seção anterior percebemos que poucos são capazes de produzir imagens tridimensionais, são de pequeno tamanho e os que são capazes de produzir imagens tridimensionais com paralaxe apenas reproduzem imagens criadas por computador, não vídeos.

Em comparação, as vantagens da tela holográfica são:

- Produz imagens tridimensionais com paralaxe horizontal contínua.
- A resolução das imagens geradas por ela está apenas limitada pela resolução dos projetores multimídia, atualmente.
- Permite a projeção de imagens maiores que a maioria dos sistemas atuais.
- Dispensa o uso de óculos ou equipamentos especiais para visualização.
- Possui amplo campo de observação.
- Possui aplicações que permitem a visualização de imagens animadas e de vídeo fora do plano da tela.
- Pode ser produzida a relativo baixo custo.

- É uma tecnologia nacional inovadora.

1.7 Objetivos gerais da tese de doutorado

Os objetivos desta tese são:

- Fundamentação e obtenção de três diferentes tipos de *Telas Holográficas* por meio de técnicas holográficas com laser contínuo buscando otimizar sua eficiência de difração e tamanho.
- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de imagens tridimensionais com luz branca utilizando as telas holográficas obtidas.

1.8 Novidade científico - técnica na tese de doutorado

As novidades apresentadas nesta tese são:

- Pela primeira vez as técnicas de construção de uma *tela holográfica* são mostradas e analisadas, buscando as características relevantes para obtenção de melhores eficiências difrativas.
- Foi desenvolvido um novo tipo de tela holográfica, a Tela Holográfica Verticalmente Dispersiva.
- Foram criadas novas aplicações de sistemas formadores de imagens utilizando as telas holográficas desenvolvidas.

Parte II

Telas Holográficas

.

A tela holográfica é um elemento óptico difrativo (DOE) [1] gerado pela interferência de dois feixes monocromáticos, que quando iluminado a redistribui a luz que recebe para um observador.

Neste parte da dissertação apresentamos e descrevemos três tipos diferentes de Telas Holográficas obtidos de quatro maneiras diferentes.

- Telas holográficas simples
- Telas holográficas horizontalmente dispersivas (HDHS)
- Telas holográficas verticalmente dispersivas (VDHS)

Apesar do modo de gravação dessas telas serem parecidos, elas possuem propriedades e aplicações bem diferentes (Parte IV). Outras aplicações sobre as telas holográficas desenvolvidas previamente a esse trabalho de tese são apresentadas no Apêndice F.

No início do capítulo que segue também explicamos como funciona uma rede de difração comum utilizada como tela holográfica, apresentando suas vantagens e desvantagens em relação às Telas holográficas simples e às de campo estendido.

.

Capítulo 2

Telas holográficas simples

Uma tela holográfica simples é obtida pela gravação do padrão de interferência de dois feixes monocromáticos divergentes. Este tipo de elemento óptico difrativo também é conhecido como *Lente difrativa* [49] e os elementos obtidos com a interferência de dois feixes divergentes chamaremos de *Telas holográficas simples* (THS). Em algumas aplicações necessitamos de uma tela com pequena distância focal e, para este propósito, construímos *Telas holográficas simples de curta distância focal*.

Uma estrutura periódica, como uma rede de difração convencional ou um compact disc, pode ser empregada como tela holográfica, porém com restrição de campo de observação [38].

2.1 Rede de difração usada como tela holográfica

Uma rede de difração também pode ser utilizada como tela holográfica em um sistema semelhante ao da HoloTV de plano único [50] (Capítulo 7). A Figura 2.1 representa o sistema onde um o projetor (P) projeta a imagem sobre a rede de difração DG1 e a ordem difratada atinge a segunda rede (DG2). Um observador (O) observa a imagem resultante.

Este sistema possui as seguintes limitações:

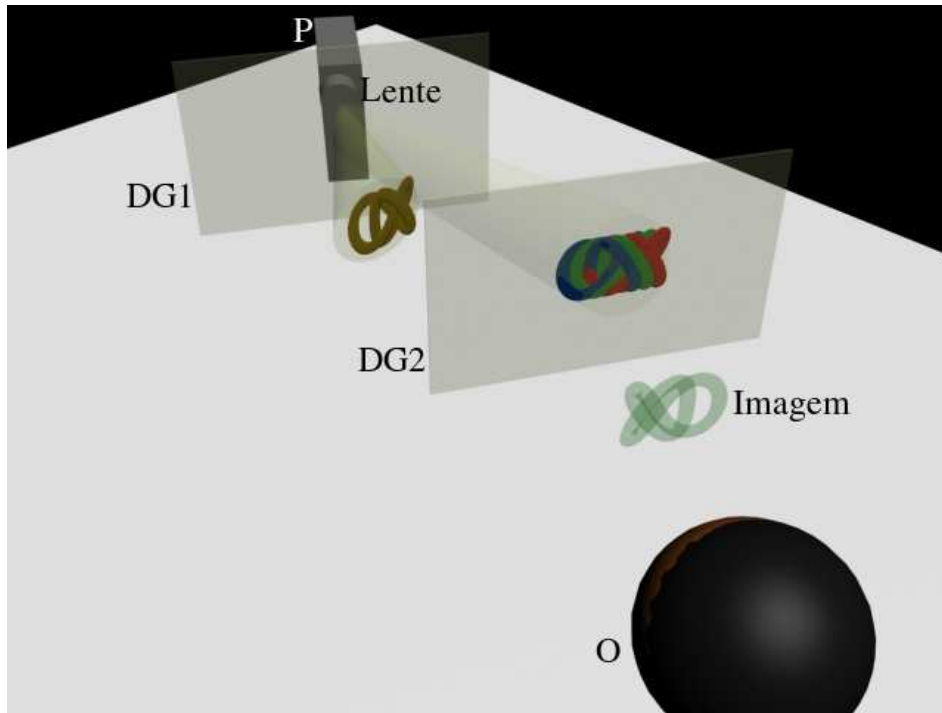


Figura 2.1: Sistema de projeção formado por duas redes de difração (DG). O projetor (P) projeta a imagem sobre a rede de difração DG1 e a ordem difratada é focalizada por uma lente (L) sobre a segunda rede (DG2). Um observador (O) observa a imagem resultante.

- Campo vertical limitado pela extensão angular que oferece a lente projetora (Figura 2.2).
- Campo horizontal proporcional a dispersão da rede, ou seja, depende de sua frequência espacial [38].
- Necessidade do olho que ajuda na convergência que não faz a rede [37], reduzindo o astigmatismo, devido a abertura reduzida da pupila.

E as seguintes vantagens:

- É possível obter redes de difração tão grandes quanto se queira utilizando um sistema de gravação por partes (semelhante ao apresentado no Apêndice D, mas utilizando ondas planas).

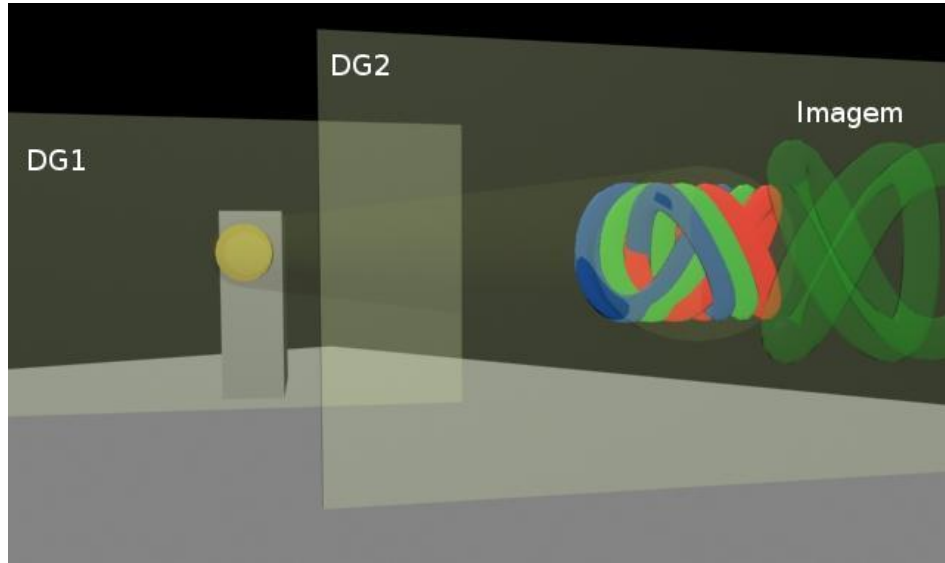


Figura 2.2: Visão do observador. Campo vertical é limitado pela extensão angular que oferece a lente projetora.

- Conserva a paralaxe vertical, mas esta depende da abertura numérica da lente projetora.

Devido a força das desvantagens desconsideramos o emprego das redes de difração como elemento decodificador no estado atual da tecnologia disponível.

Um elemento difrativo definido bi-dimensionalmente também pode ser empregado de maneira semelhante [38] com a vantagem que estes são capazes de fazer imagens sem astigmatismo, aberração presente em um sistema de dupla difração com redes [37]. Apesar disso, geralmente é possível encontrar redes de difração de maior eficiência difrativa que os *compact discs*; dessa forma os CDs apresentam imagens de menor brilho. A Figura 2.3 mostra uma montagem que utiliza dois CDs como elementos codificadores e decodificadores.

A Figura 2.4(a) mostra uma imagem feita utilizando redes de difração (Figura 2.1) e a Figura 2.4(b) mostra uma imagem feita utilizando CDs (Figura 2.3).

Considerando os casos de redes e CDs, ambos não apresentam imagens satisfatórias devido ao pequeno campo vertical de observação, impossibilitando uma comodidade na observação das imagens. Assim utilizamos as telas holográficas para aplicações de

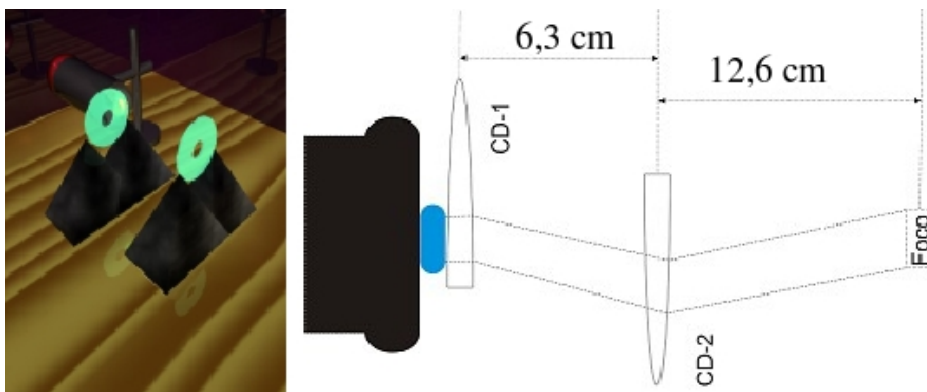


Figura 2.3: Sistema para projeção de imagens utilizando dois CDs sem a camada refletora.

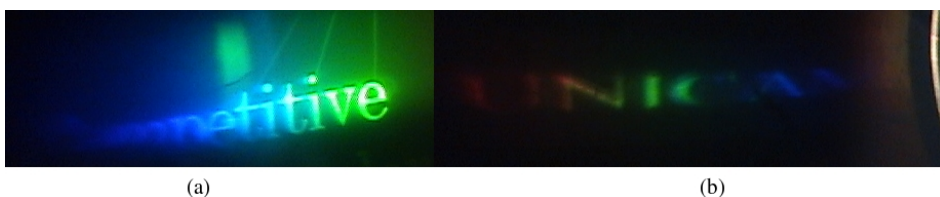


Figura 2.4: (a) Uma imagem feita utilizando redes de difração e (b) Uma imagem feita utilizando CDs.

projeção.

2.2 Descrição geométrica das telas holográficas simples

Um caso mais geral desse tipo de tela ocorre quando a gravação do padrão de interferência é formado por duas fontes que não estejam ambas no eixo óptico e ortogonais ao filme como ocorre com as placas zonais (Capítulo 1.2.1). A Figura 2.5 mostra a representação referida.

O padrão de interferência formado pelos dois feixes pode ser calculado através da diferença de caminho óptico Δl que deve ser um máximo quando for igual a $n\lambda$. Pela Figura 2.5, $\Delta l = r + s - t$, considerando que as ondas estavam em fase no ponto P. Experimentalmente a diferença de caminho óptico dos feixes fica limitada por ter de

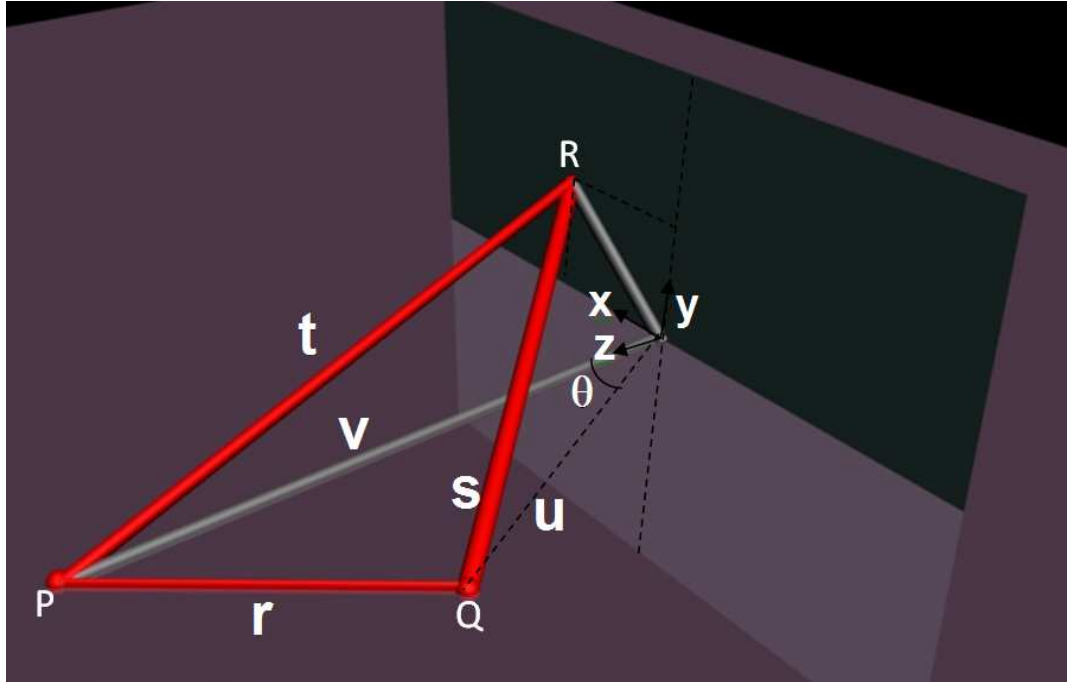


Figura 2.5: Interferência de duas fontes pontuais.

ser menor que o comprimento de coerência do laser empregado.

As distâncias r , s e t podem ser calculadas geometricamente, o que resulta em um Δl igual a

$$\Delta l = \sqrt{v^2 + u^2 - 2uv\cos\theta} + \sqrt{(x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2 + z_Q^2} - \sqrt{v^2 + x^2 + y^2} \quad (2.1)$$

onde x_Q , y_Q e z_Q são as coordenadas do ponto Q, origem do feixe objeto.

Quando fazemos $\Delta l = n\lambda$ encontramos a posição na n -ésima curva de nível [51] gravada no material fotossensível. As expressões acima são validas para qualquer posição (x,y) no plano de gravação, pois não foi aproximado paraxialmente.

Quando nenhuma das fonte se encontra no eixo óptico, estando em qualquer posição dos espaço, temos que as curvas de nível são encontradas pela relação 2.2

$$\sqrt{(x_Q - x_P)^2 + (y_Q - y_P)^2 + (z_Q - z_P)^2} + \sqrt{(x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2 + z_Q^2} - \sqrt{(x_P - x)^2 + (y_P - y)^2 + z_P^2} = n\lambda \quad (2.2)$$

A Figura 2.6 mostra uma aproximação da estrutura gravada em uma tela simples quando as duas fontes estão a mesma distância da tela. As hipérboles formadas não estão igualmente separadas.

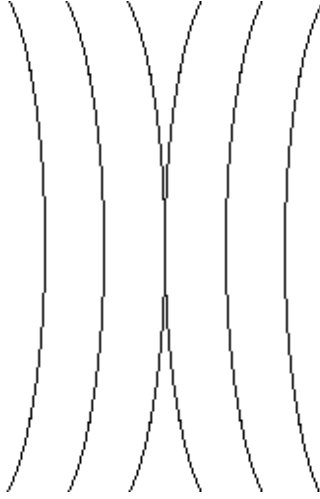


Figura 2.6: Figura gerada na interferência de duas fontes pontuais, tela holográfica simples. A distância entre as franjas é da ordem de $1\mu m$

2.3 Descrição ondulatória das telas holográficas simples

Consideramos a gravação de uma tela holográfica simples com duas fontes pontuais, a fonte referência e a objeto, em qualquer posição do espaço [52]. Nosso objetivo é encontrar a posição de formação do ponto imagem após a gravação e iluminação da tela por uma outra fonte luminosa situada também em qualquer posição do espaço.

Na Figura 2.7(a) supomos que a onda referência é gerada por uma fonte pontual em

(x_r, y_r, z_r) e a onda objeto é gerada por uma fonte situada em (x_o, y_o, z_o) . Chamaremos de λ_1 o comprimento de onda referência e objeto, consideramos estas fontes mutuamente coerentes. De acordo com a figura, se as fontes estão do lado esquerdo do filme (fontes divergentes) terão z 's negativos e se estiverem do lado direito (fontes convergentes) terão z 's positivos.

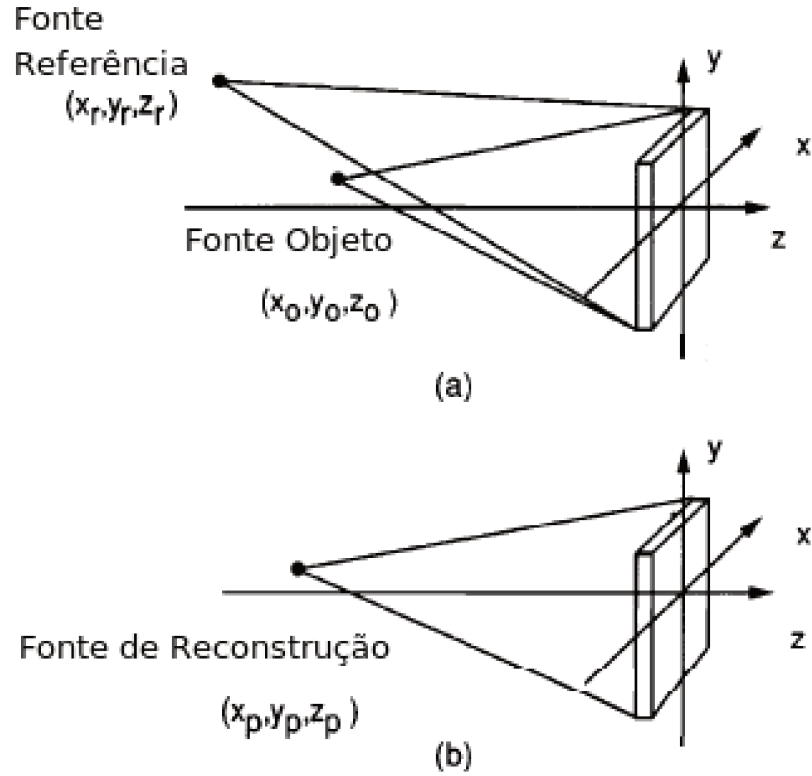


Figura 2.7: Geometrias generalizadas de (a) gravação e (b) reconstrução

Durante a reconstrução, ilustrada na Figura 2.7(b), a tela já gravada é iluminada por uma fonte esférica situada em (x_p, y_p, z_p) . Novamente z_p é negativo para ondas divergentes e positivo para convergentes. Chamaremos de λ_2 o comprimento de onda na reconstrução.

O campo total incidente no filme é

$$U(x, y) = \mathbf{A} \frac{\exp\left\{\frac{j2\pi}{\lambda_1} r_r\right\}}{r_r} + \mathbf{a} \frac{\exp\left\{\frac{j2\pi}{\lambda_1} r_o\right\}}{r_o} \quad (2.3)$$

onde $\mathbf{A}$ e $\mathbf{a}$ são constantes complexas que representam as amplitudes e fases relativas das duas ondas. Cada r_k , distância da fonte pontual ao ponto (x,y) no plano de gravação, é dado pela equação 2.4

$$r_k = \sqrt{z_k^2 + (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (2.4)$$

A intensidade resultante é

$$I(x, y) = \|\mathbf{A}\|^2 + \|\mathbf{a}\|^2 + \frac{\mathbf{A}\mathbf{a}^*}{r_o r_r} \exp\left\{\frac{j2\pi}{\lambda_1} r_r - \frac{j2\pi}{\lambda_1} r_o\right\} + \frac{\mathbf{A}^* \mathbf{a}}{r_o r_r} \exp\left\{-\frac{j2\pi}{\lambda_1} r_r + \frac{j2\pi}{\lambda_1} r_o\right\} \quad (2.5)$$

Se a transmitância do filme holográfico revelado é proporcional a exposição, então os termos importantes da função de transmitância são:

$$\begin{aligned} t_3 &= \beta \frac{\mathbf{A}\mathbf{a}^*}{r_o r_r} \exp\left\{\frac{j2\pi}{\lambda_1} r_r - \frac{j2\pi}{\lambda_1} r_o\right\} \\ t_4 &= \beta \frac{\mathbf{A}^* \mathbf{a}}{r_o r_r} \exp\left\{-\frac{j2\pi}{\lambda_1} r_r + \frac{j2\pi}{\lambda_1} r_o\right\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

A filme revelado é iluminado por uma onda esférica

$$U_p(x, y) = \frac{\mathbf{B}}{r_p} \exp\left\{\frac{j2\pi}{\lambda_2} r_p\right\} \quad (2.7)$$

onde $\mathbf{B}$ é uma constante complexa.

As duas frentes de onda de interesse após a transparência são encontradas multiplicando 2.6 por 2.7.

$$\begin{aligned} U_3(x, y) &= t_3 \frac{\mathbf{B}}{r_p} \exp \left\{ \frac{j2\pi}{\lambda_2} r_p \right\} \\ U_4(x, y) &= t_4 \frac{\mathbf{B}}{r_p} \exp \left\{ \frac{j2\pi}{\lambda_2} r_p \right\} \end{aligned} \quad (2.8)$$

que resulta em

$$\begin{aligned} U_3(x, y) &= \beta \frac{\mathbf{Aa}^*\mathbf{B}}{r_o r_r r_p} \exp \left\{ j2\pi \left[\frac{r_r - r_o}{\lambda_1} + \frac{r_p}{\lambda_2} \right] \right\} \\ U_4(x, y) &= \beta \frac{\mathbf{A}^*\mathbf{aB}}{r_o r_r r_p} \exp \left\{ j2\pi \left[\frac{-r_r + r_o}{\lambda_1} + \frac{r_p}{\lambda_2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Para descobrirmos a posição que esta onda convergirá é conveniente usar a aproximação quadrática para ondas esféricas. Para isso consideramos cada r_k (eq. 2.4) como os dois primeiros termos da aproximação binomial

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots \quad (2.10)$$

Logo, na aproximação paraxial, cada r_k será aproximado por

$$r_k \cong z_k \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[\frac{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}{z_k^2} \right] \right\} \quad (2.11)$$

Os campos paraxiais resultantes tornam-se proporcionais a

$$\begin{aligned}
U_3(x, y) &\propto \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda_1} \left[\frac{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2}{z_r} - \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{z_o} \right] \right\} \\
&\quad \times \exp \left\{ j\pi \frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{z_p \lambda_2} \right\} \\
U_4(x, y) &\propto \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda_1} \left[-\frac{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2}{z_r} + \frac{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}{z_o} \right] \right\} \\
&\quad \times \exp \left\{ j\pi \frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{z_p \lambda_2} \right\}. \quad (2.12)
\end{aligned}$$

Expandindo os quadrados das exponenciais e reagrupando obtemos

$$\begin{aligned}
U(x, y) &\propto \exp \left\{ j\pi(x^2 + y^2) \left[\mp \frac{1}{z_o \lambda_1} \pm \frac{1}{z_r \lambda_1} + \frac{1}{z_p \lambda_2} \right] \right\} \\
&\times \exp \left\{ j\pi \left[x \left(\pm \frac{2x_o}{z_o \lambda_1} \mp \frac{2x_r}{z_r \lambda_1} - \frac{2x_p}{z_p \lambda_2} \right) + y \left(\pm \frac{2y_o}{z_o \lambda_1} \mp \frac{2y_r}{z_r \lambda_1} - \frac{2y_p}{z_p \lambda_2} \right) \right] \right\} \\
&\quad \times \exp \left\{ j\pi \left[\mp \frac{x_o^2 + y_o^2}{z_o \lambda_1} \pm \frac{x_r^2 + y_r^2}{z_r \lambda_1} + \frac{x_p^2 + y_p^2}{z_p \lambda_2} \right] \right\} \quad (2.13)
\end{aligned}$$

onde os sinais de cima correspondem a componente U_3 da onda e os sinais de baixo a componente U_4 .

Para identificar a natureza destas ondas transmitidas, devemos examinar a dependência (x,y). Porque nessa aproximação paraxial existem apenas componentes lineares e quadráticos em x e y, as duas expressões U_3 e U_4 podem ser tratadas como aproximação quadrática de ondas esféricas saindo do holograma. A presença de termos lineares em x e em y simplesmente indica que as ondas fora do eixo z , podendo estar convergindo ou divergindo.

Podemos identificar as coordenadas da imagem (x_i, y_i, z_i) , comparamos 2.13 com uma onda esférica imagem.

$$U_i(x, y) = \mathbf{K} \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda_2 z_i} [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \right\} \quad (2.14)$$

Comparando o termo em $(x^2 + y^2)$ de 2.14 com 2.13 encontramos z_i .

$$z_i = \left[\frac{1}{z_p} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(\pm \frac{1}{z_r} \mp \frac{1}{z_o} \right) \right]^{-1} = \left[\frac{1}{z_p} \pm \frac{\lambda_2}{\lambda_1} f^{-1} \right]^{-1} \quad (2.15)$$

onde definimos f como

$$f = \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_o} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

pois é uma distância que depende somente de distâncias no momento da gravação.

Quando z_i é negativo, a imagem é virtual e é formada do lado esquerdo da tela e quando z_i é positivo a imagem é real e é formada do lado direito da tela.

As coordenadas x_i e y_i são encontradas comparando 2.13 com os termos lineares de 2.14, isto é, o termo

$$\exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda_2 z_i} (x_i x + y_i y) \right\} \quad (2.17)$$

Finalmente,

$$x_i = \mp \frac{\lambda_2 z_i}{\lambda_1 z_o} x_o \pm \frac{\lambda_2 z_i}{\lambda_1 z_r} x_r + \frac{z_i}{z_p} x_p \quad (2.18)$$

$$y_i = \mp \frac{\lambda_2 z_i}{\lambda_1 z_o} y_o \pm \frac{\lambda_2 z_i}{\lambda_1 z_r} y_r + \frac{z_i}{z_p} y_p \quad (2.19)$$

As equações 2.15, 2.18 e 2.19 são as relações fundamentais que nos permitem prever a localização dos pontos imagens resultantes do processo holográfico.

2.4 Reconstrução de um ponto objeto com uma tela holográfica simples

Como as telas holográficas são elementos difrativos, e cada elemento infinitesimal de área é regido pela equação 1.1, temos que a posição da reconstrução de um ponto iluminando a tela é uma função do comprimento de onda da fonte. A Figura 2.8 mostra a formação do ponto imagem (x_i, y_i, z_i) por uma tela holográfica simples (HL) após sua iluminação com uma fonte pontual situada em (x_p, y_p, z_p) .

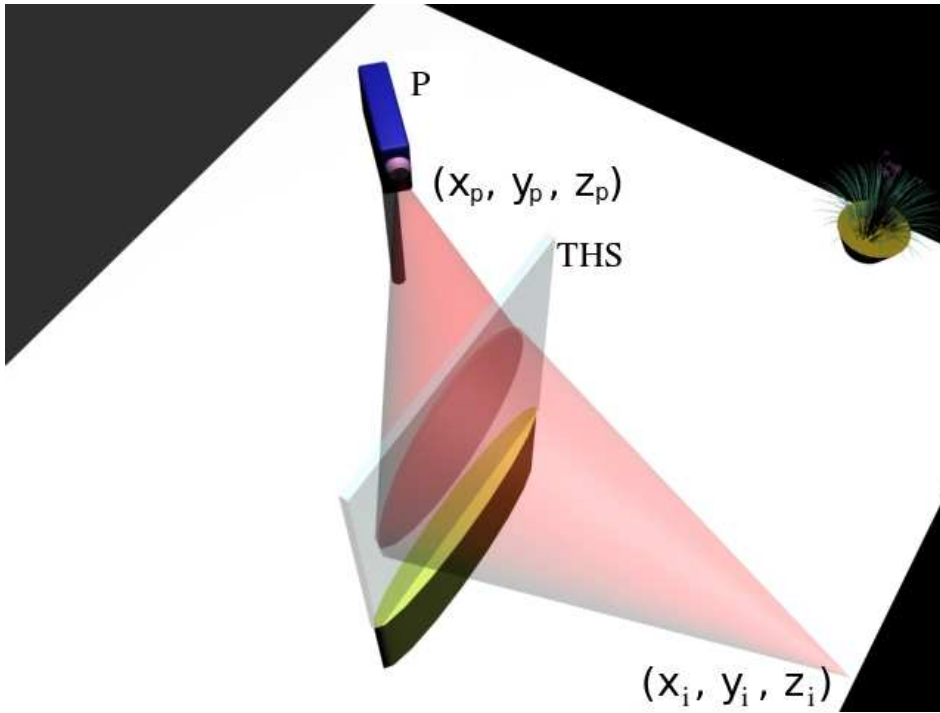


Figura 2.8: Um projetor monocromático (P) origina um ponto de luz divergente de comprimento de onda λ_2 que converge logo após atravessar a tela holográfica (THS). z_p é a distância de projeção e z_i é a distância de focalização, ambas ortogonais a THS. As coordenadas da fonte pontual de projeção são (x_p, y_p, z_p) e as coordenadas do ponto imagem são (x_i, y_i, z_i) .

A distância transversal de focalização do ponto imagem z_i é dada pela equação 2.15 [52]. A posição horizontal (x_i) e vertical (y_i) deste ponto imagem são dados pelas equações 2.18 e 2.19 [52].

Quando a tela é iluminada por uma fonte pontual de luz branca, como mostrado na

Figura 2.9, temos cada comprimento de onda focalizado em uma diferente posição dado pelas equações 2.18, 2.19 e 2.15. O campo de observação para esse ponto está limitado para comprimentos de onda extremos do espectro calculados por essas equações.

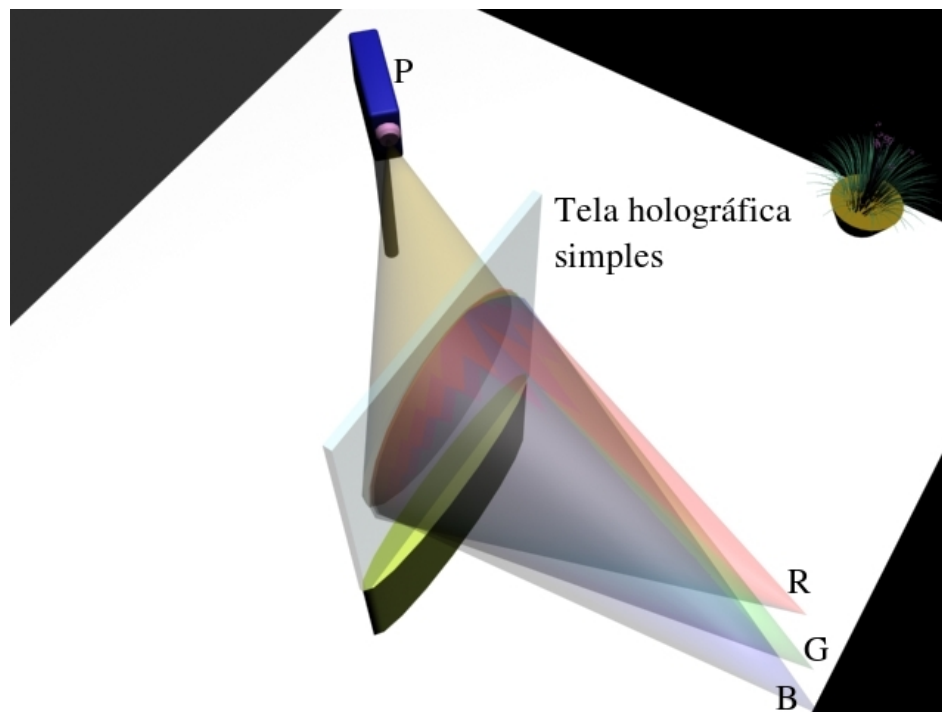


Figura 2.9: Iluminação da tela holográfica simples por um ponto de luz branca.

.

Capítulo 3

Telas holográficas com extensão de campo vertical

Como vimos no Capítulo 2 o campo de vista do observador nas telas simples é reduzido porque a partir de um ponto objeto obtemos um ponto imagem (Figura 2.8). Através da introdução de um difusor na posição da origem do feixe objeto, que resulta em uma linha difusora, conseguimos a extensão do campo de observação nas aplicações que utilizam a tela holográfica. Esta extensão permite maior comodidade para o observador na visualização de imagens. Este tipo de tela holográfica é chamado de *tela holográfica horizontalmente dispersiva* (Em inglês, HDHS), pois é na horizontal que ocorre a dispersão cromática.

Um novo tipo de tela holográfica foi desenvolvido durante este trabalho de tese buscando aplicações estereoscópicas sem a utilização de óculos ou qualquer equipamento adicional para visualização. Utilizando essa técnica seria possível, por exemplo, para um cirurgião visualizar imagens tomográficas durante uma cirurgia. Essa tela também utiliza um difusor na gravação, mas em diferente configuração que resulta em uma tela onde a difração ocorre na vertical, por isso a chamamos de *tela holográfica verticalmente dispersiva* (Em inglês, VDHS).

As descrições geométrica e ondulatória apresentadas para as telas holográficas simples (Seções 2.2 e 2.3) também são válidas para as telas holográficas com extensão de campo vertical, quando consideramos que um objeto extenso coerente pode ser tratado como uma coleção de pontos mutuamente coerentes. Necessitamos conhecer a distância focal para a caracterização das telas holográficas com extensão de campo vertical. Como durante a gravação cada ponto do objeto extenso (linha difusora) encontra-se a mesma distância do filme holográfico, podemos descobrir a focal da tela com o mesmo tratamento usado para as telas holográficas simples. Se uma descrição mais completa fosse requerida, poderíamos encontrar numericamente a transmitância da tela pela soma do padrão, formado pela coleção de pontos que forma o objeto extenso.

3.1 Telas holográficas horizontalmente dispersivas

Essa tela corresponde à tela para iluminação lateral, ou seja, para dispersão horizontal. Com este tipo de tela holográfica, o campo de vista vertical é estendido, permitindo uma postura mais confortável do observador nas aplicações que envolvem projeções de luz branca e o acesso direto a observadores de alturas diferentes.

O aumento do campo pode ser obtido holograficamente, estendendo a idéia de um ponto divergente para uma gama de pontos divergentes na origem do feixe objeto. Este conjunto de pontos poderia ser uma linha difusora vertical, onde cada ponto da linha ilumina todo o filme.

Como as telas holográficas são elementos difrativos, e cada elemento infinitesimal de área é regido pela equação 1.1, temos que a posição da reconstrução de um ponto iluminando a tela é uma função do comprimento de onda da fonte. A Figura 3.1 mostra a formação da imagem do difusor em três cores do espectro quando a tela HDHS é iluminada por uma fonte pontual de luz branca.

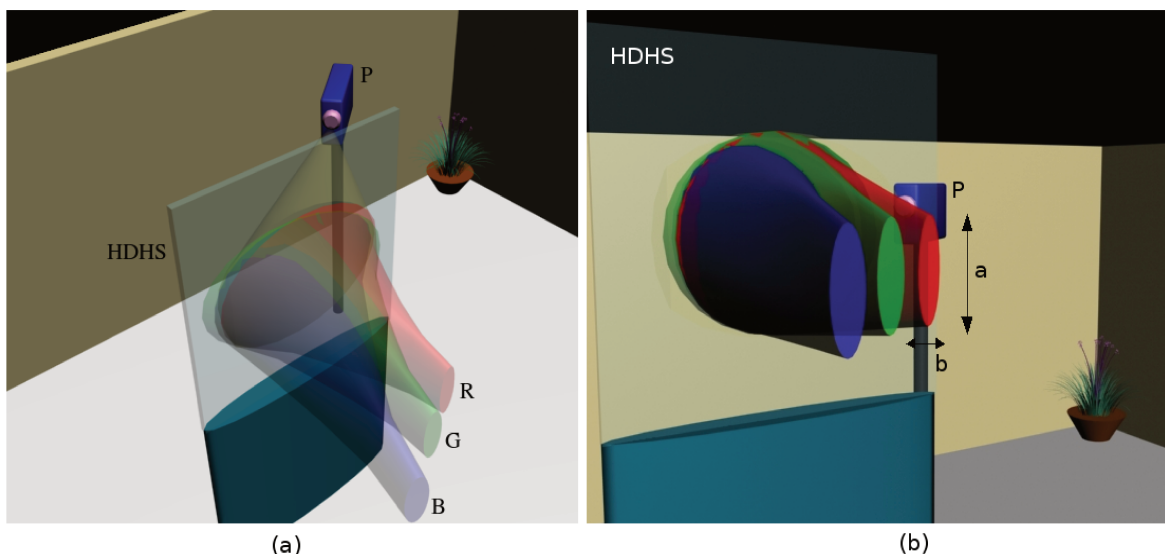


Figura 3.1: (a) A tela holográfica horizontalmente dispersiva sendo iluminada por um feixe divergente de luz branca. R, G e B são as representações das imagens vermelha, verde e azul do difusor. (b) Visão da dispersão cromática feita pela tela no plano horizontal. A imagem feita do difusor para cada λ , de altura a e largura b , aparece disposta lateralmente. Nas telas gravadas buscamos ter a grande e reduzir ao máximo b . Essas dimensões são proporcionais as dimensões do difusor (Figura 5.1)

3.2 Telas holográficas verticalmente dispersivas

Esta tela corresponde a tela para iluminação por baixo ou por cima, ou seja, para dispersão vertical. Este novo tipo de tela foi desenvolvido pensando em um novo tipo de aplicação das telas holográficas, o projetor por fonte linear e o estereoscópio, que serão explicados nos Capítulos 9 e 10.

A Figura 3.2 mostra a formação da imagem do difusor quando a tela VDHS é iluminada por uma fonte pontual divergente de luz branca. R e B são as representações das imagens vermelha e azul do difusor, que formam o extremo do campo de observação. Na região W ocorre a superposição das imagens do difusor e um observador localizado nesta região verá a tela iluminada na cor branca.

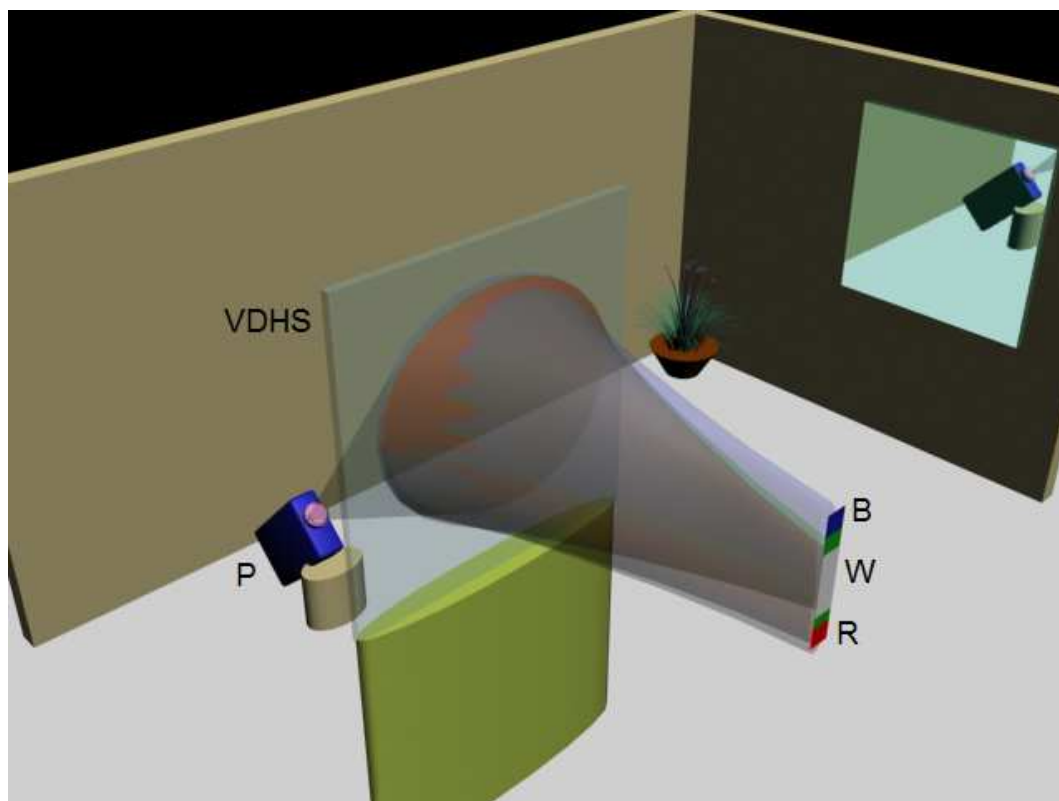


Figura 3.2: A tela holográfica verticalmente dispersiva sendo iluminada por um feixe divergente de luz branca originado de um projetor P. R e B são as representações das imagens vermelha e azul do difusor. Na região W ocorre a superposição das imagens do difusor.

Parte III

Construção de Telas Holográficas

.

Capítulo 4

Gravação de Telas Holográficas Simples

Uma tela holográfica simples pode ser considerada como um tipo de lente difrativa [52] construída para ser usada em projeções com luz branca, ou seja, funcionando como uma tela.

Neste capítulo apresentamos dois tipos de gravações de telas holográficas simples nas seções 4.1 e 4.2, apresentamos os resultados das gravações e analisamos os resultados na seção 4.3. O procedimento no processamento químico utilizado na revelação e no branqueamento das telas holográficas é apresentado no Capítulo 6.

4.1 Telas simples com dois feixes divergentes

Com este método, buscamos gravar em um filme holográfico de alta resolução o padrão de interferência de dois feixes divergentes [53]. As primeiras gravações foram realizadas sem mesa estabilizada e utilizando um laser de diodo para obtenção de telas de até 120 cm² (Apêndice B). Devido a necessidade de potências maiores e principalmente maior coerência, passamos a utilizar lasers de gás He-Ne. O motivo da não utilização de mesas estabilizadas até então era justificado pelo objetivo de obter telas grandes, e não

tínhamos mesas com dimensões lineares maiores que 2 m. Conseguimos um resultado razoável e desenvolvemos técnicas que melhoraram em mais de 100% a eficiência [54], chegando até a 5,4% para o vermelho, mas a reprodutibilidade dos resultados não era boa. O sistema de estabilização desenvolvido para gravação de telas holográficas simples sem mesa estabilizada é apresentado no Apêndice C. Quando conseguimos uma mesa maior (2,8m x 1,5m), passamos a utilizar um sistema pneumático de estabilização.

A Figura 4.1 mostra o esquema utilizado na montagem para obtenção de uma tela holográfica simples com dois feixes diretos. O feixe colimado de um laser de He-Ne com 60 mW (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M) até chegar a um filtro espacial (SP). O primeiro filtro espacial (SP1) é formado por uma objetiva de microscópio de 20x com um orifício de $25\ \mu\text{m}$ e o segundo (SP2) por uma objetiva de 40x com um orifício de $15\ \mu\text{m}$. Ambos os feixes divergem até chegar ao filme holográfico (HF). O filme holográfico empregado foi o Agfa 8E75 HD e o ângulo entre os feixes foi de 25° . As distâncias utilizadas são $\text{SP1-HF} = (38 \pm 2)\ \text{cm}$ e $\text{SP2-HF} = (200 \pm 3)\ \text{cm}$.

As distâncias transversais entre a fonte objeto (z_o) e a fonte referência (z_r) com o filme definem a distância focal (eq. 2.16), como é mostrado na Figura 4.2.

Com esta montagem, minimizamos a diferença de caminho óptico Δl entre os feixes de tal forma a reduzi-la a quase zero no centro da tela e menor que o comprimento de coerência do laser em questão (16 cm) para dois pontos quaisquer na tela (eq.2.1). Ambos os feixes possuíam a mesma polarização, condição necessária para a interferência [55].

O procedimento no processamento químico utilizado na revelação e no branqueamento das telas holográficas é apresentado no Capítulo 6.

Uma tela holográfica simples também pode ser obtida por partes através da múltipla exposição em pequenas partes de modo a completar um filme holográfico grande de “pequenas telas”. Tal técnica é mostrada no Apêndice D.

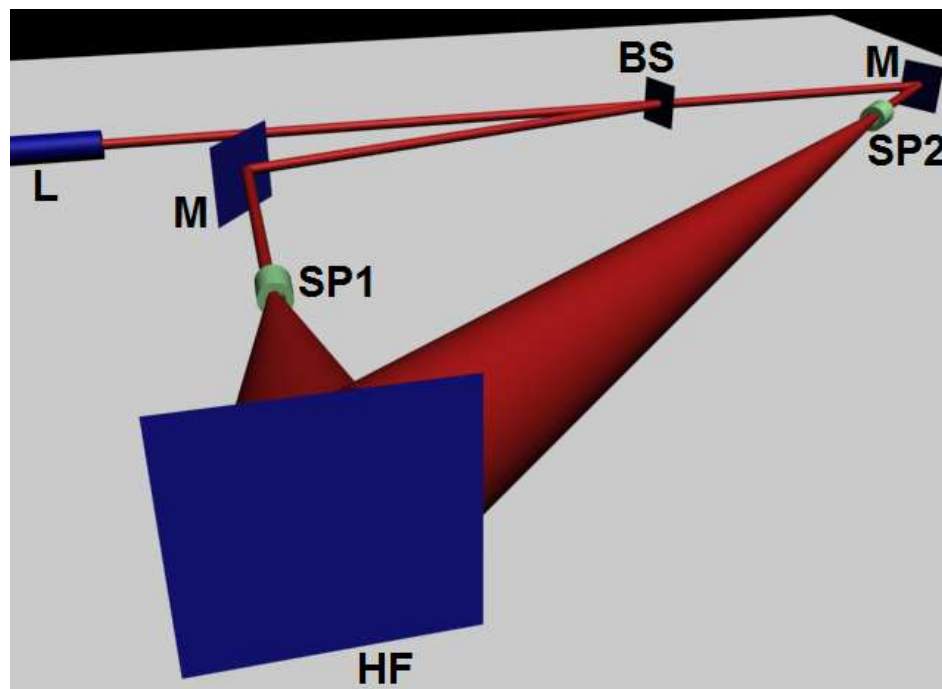


Figura 4.1: Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica simples usando dois feixes diretos. O feixe colimado de um laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M) até chegar a um filtro espacial (SP). Ambos os feixes divergem até chegar ao filme holográfico (HF).

4.2 Telas holográficas simples de curta distância focal

Com este sistema buscamos obter distâncias focais mais curtas, utilizando um feixe divergente e outro convergente. Distâncias focais curtas são importantes para aplicações como a apresentada no Capítulo 10. Com o feixe objeto convergindo logo após o filme holográfico se consegue uma pequena distância focal que só seria possível, comparando com o esquema apresentado na Figura 4.1, aproximando a origem do feixe objeto ao filme. Na prática esta aproximação resulta difícil pois o filtro espacial SP2 (Figura 4.1), que gera a divergência, deveria estar muito próximo ao filme. Com a proximidade, SP2 faz com que o feixe referência crie uma sombra no filme holográfico.

Para conseguir um feixe convergente usamos uma lente refrativa. As lentes refrativas

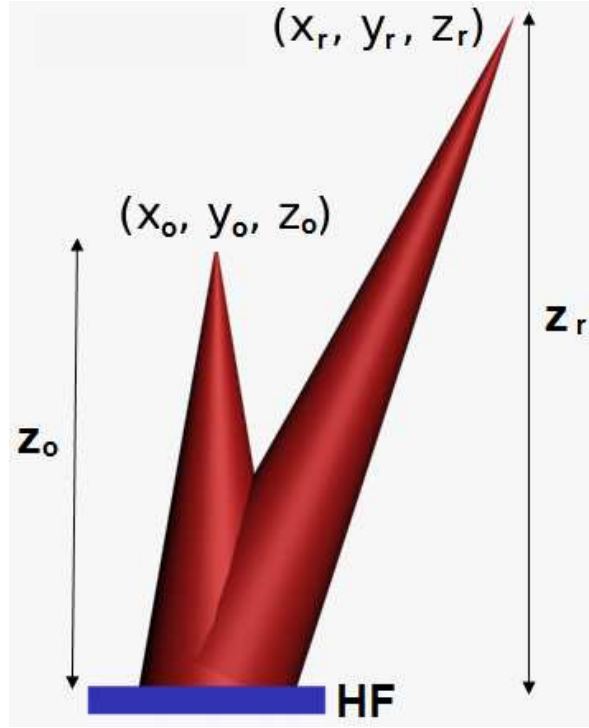


Figura 4.2: Interferência de duas ondas esféricas em filme holográfico (HF) resultando em uma tela holográfica simples. z_r e z_o são as distâncias transversais da origem dos feixes referência e objeto ao plano de HF. A onda referência é gerada por uma fonte pontual em (x_r, y_r, z_r) e a onda objeto por uma fonte em (x_o, y_o, z_o) .

de Fresnel [56, 57] apresentam grande abertura numérica e boa qualidade óptica, por isso as escolhemos para gerar o feixe convergente.

Mesmo utilizando uma Lente de Fresnel que possui abertura de 20 cm, estas telas apresentam tamanho reduzido e são para observações próximas, interessantes para aplicações estereoscópicas [58, 59]. Essas telas permitem, por outro lado, testar a combinação de duas lentes difrativas de diferentes frequências espaciais para obter imagens por dupla difração dos tipos [39, 25, 60], algo que com luz branca nunca havia sido realizado.

A Figura 4.3 mostra o esquema de obtenção de uma tela holográfica deste tipo. O feixe de um laser de 10 mW (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho (M) até chegar a um filtro espacial (SP). O primeiro filtro espacial (SP1) é uma objetiva de microscópio de 20x com um

orifício de $25\ \mu\text{m}$ e o segundo (SP2) uma objetiva de 40x com um orifício de $15\ \mu\text{m}$. O feixe que sai de SP1 diverge até chegar no filme (HF) e o feixe que diverge de SP2 encontra uma lente de Fresnel (FL) que o faz convergir até encontrar HF. A distância focal da lente de Fresnel era de 28 cm. As distâncias utilizadas são $\text{SP2-FL} = (53 \pm 1)$ cm, $\text{FL-HF} = (31 \pm 1)$ cm, $\text{SP1-HF} = (30 \pm 1)$ cm. Foram gravadas telas com ângulo entre os feixes de 25° e 45° .

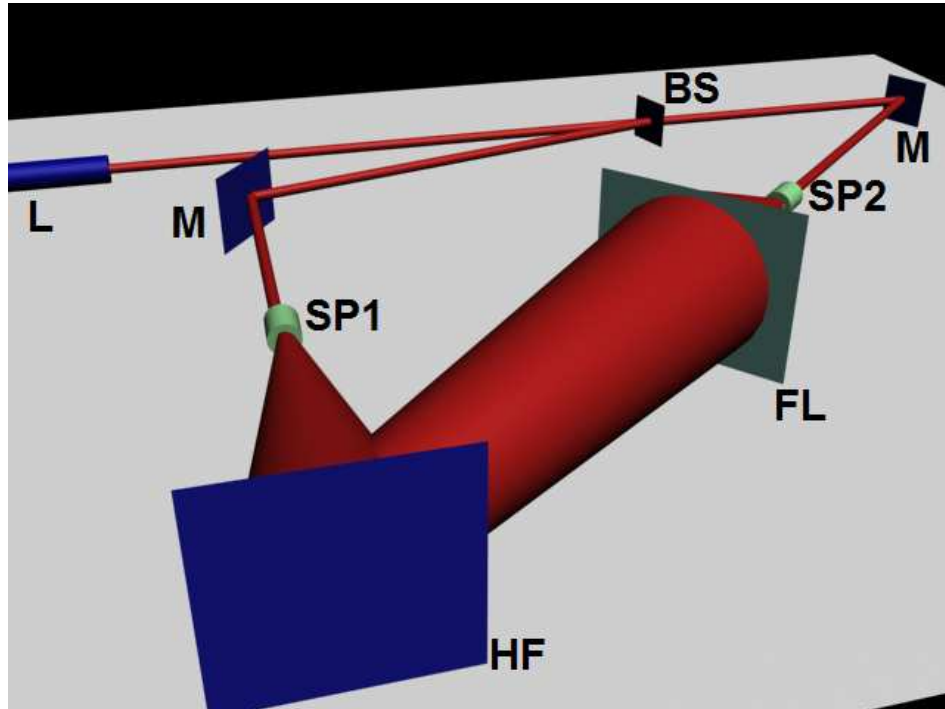


Figura 4.3: Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica usando um feixe divergente e um feixe convergente. O feixe laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho (M) até chegar a um filtro espacial (SP). O feixe que sai de SP1 diverge até chegar no filme (HF) e o feixe que diverge de SP2 encontra uma lente de Fresnel (FL) que o faz convergir até encontrar HF.

As distâncias transversais entre a fonte objeto (z_o) e o ponto de convergência de FL (z_r) com o filme definem a distância focal (eq. 2.16), como é mostrado na Figura 4.4.

Com esta montagem, minimizamos a diferença de caminho óptico entre os feixes de tal forma a reduzi-la a quase zero no centro, sendo assim menor que o comprimento de coerência do laser em questão, aproximadamente 2,5 m, em outros pontos do filme.

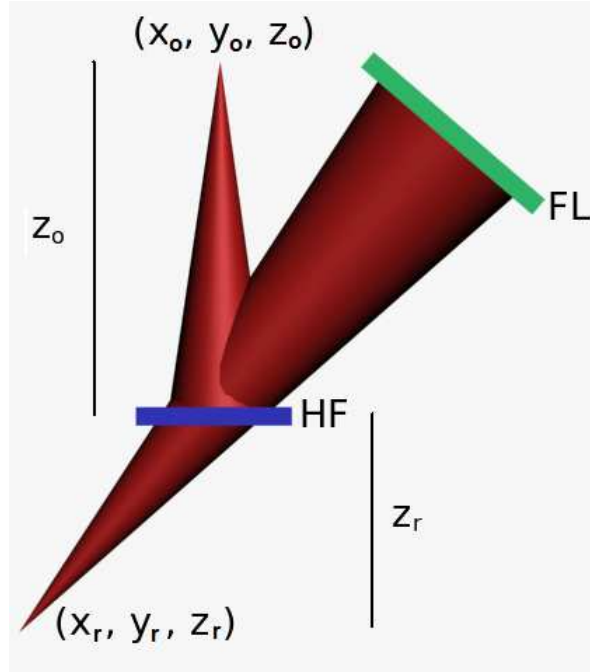


Figura 4.4: Esquema das distâncias utilizadas para a determinação da distância focal da tela holográfica gravada empregando uma lente de Fresnel. A onda referência converge em (x_r, y_r, z_r) e a onda objeto é gerada por uma fonte em (x_o, y_o, z_o) .

Ambos os feixes possuíam a mesma polarização, condição necessária para a interferência [55].

O procedimento no processamento químico utilizado na revelação e no branqueamento das telas holográficas é apresentado no Capítulo 6.

4.3 Análise das telas holográficas simples e resultados experimentais obtidos

Depois de reveladas e branqueadas (Capítulo 6), as telas holográficas já têm determinados seus atributos: distância focal e eficiência de difração.

Utilizando as montagens descritas (seções 4.1 e 4.2) obtivemos os seguintes resultados apresentados na Tabela 4.1.

Os valores de f mostrados na Tabela 4.1 são os valores medidos experimentalmente.

Tabela 4.1: Resultados experimentais na gravação de telas holográficas simples (T.H.S.)

Tipo de T.H.S.	Ângulo	f^a [cm]	$\bar{\eta}^b$ [%]	Área [cm ²]
T.H.S. de curta focal	$\angle 25^\circ$	15 ± 1	34 ± 4	100
T.H.S. feixes divergentes	$\angle 25^\circ$	46 ± 1	29 ± 2	420

^a Distância focal medida incidindo um feixe colimado a 25° e medindo a posição de convergência.

^b Esta é a eficiência de difração média medida sobre toda a área da tela para $\lambda = 632$ nm.

Através da equação 2.16 obtivemos os valores teóricos para f . A Tabela 4.2 mostra uma comparação dos valores teóricos e experimentais de f . Esta diferença de valores ocorre porque as equações 2.16 e 2.15 assumem aproximação paraxial e estamos trabalhando com ângulos de 25° .

Tabela 4.2: Comparação das distâncias focais teóricas e experimentais nas telas holográficas simples (T.H.S.)

Tipo de T.H.S.	f teórica [cm]	f experimental [cm]
T.H.S. de curta focal	$13,8 \pm 0,4$	15 ± 1
T.H.S. com 2 f. divergentes	48 ± 3	46 ± 1

As incertezas de f teórico foram calculadas por propagação de erros utilizando as medidas experimentais de z_r e z_o .

A eficiência de difração de uma tela holográfica é definida pela equação 4.1 como a razão entre a intensidade difratada I_1 e a intensidade incidente I_0 [61].

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} \times 100\% \quad (4.1)$$

A difração nas telas ocorre primariamente por modulação de índice de refração, mas o relevo formado pelo padrão de interferência pode ser visto na superfície. A Figura 4.5 mostra a estrutura do relevo de uma tela holográfica simples de curta distância focal gravada com ângulo entre feixes igual a 25° . A foto foi tirada de uma região do centro do elemento e a distância entre sulcos esperada é aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$, utilizando $\lambda=632 \mu\text{m}$, $\theta_i=0^\circ$ e $\theta_d=25^\circ$ na eq. 1.1. Como a foto foi tirada em perspectiva, a distância entre os sulcos parece menor.

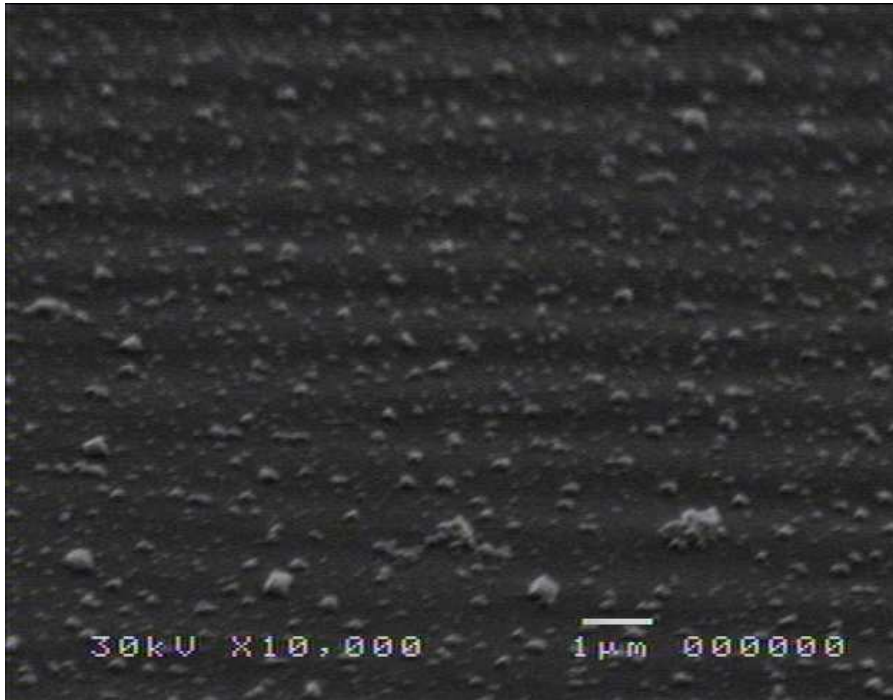


Figura 4.5: Superfície estrutural de uma tela holográfica simples de curta distância focal visualizada com microscópio eletrônico. A seta a direita da figura mostra a distância de um período do elemento.

As telas holográficas simples de curta distância focal tem uma menor área devido a dificuldade de conseguir feixes convergentes de grande abertura. A pequena distância focal deste elemento permite sua utilização em sistemas pequenos e/ou com menores eficiências luminosas como as [38]. As telas holográficas simples gravadas com dois feixes divergentes possuem tamanho e distância focal intermediários, o que permite sua aplicação em sistemas ou dispositivos maiores que requerem boa eficiência de difração com campo de observação reduzido. A eficiência de difração em relação a ordem zero das telas foi medida também utilizando laser de comprimento de onda na faixa do verde, e apesar das telas possuírem 25° e 45° entre os feixes de gravação, a diferença de eficiências vermelho-verde foi inferior a 2%.

As telas holográficas simples, comparando com as telas holográficas com extensão de campo vertical (Capítulo 5), têm maior eficiência de difração mas estas possuem menor campo de observação em aplicações tais como a HoloTV de plano único [50] (Capítulo

7). Nas telas holográficas simples o observador deve estar em uma posição fixa para observar as imagens, o que é extremamente incômodo.

Como exemplos de imagens visualizadas com as telas holográficas simples temos:

- a Figura 4.6 que foi obtida utilizando uma tela holográfica simples com feixes divergentes na aplicação *HoloTV de plano único* [50] (Capítulo 7)
- a Figura 4.7 que foi obtida utilizando uma tela holográfica simples de curta distância focal na aplicação *Holoprojeção de objetos usando um elemento difrativo e uma fonte linear* [58, 59, 25] (Capítulo 10).



Figura 4.6: À esquerda, a imagem de video projetada e à direita a imagem visualizada no sistema de holoTV utilizando uma tela holográfica simples.

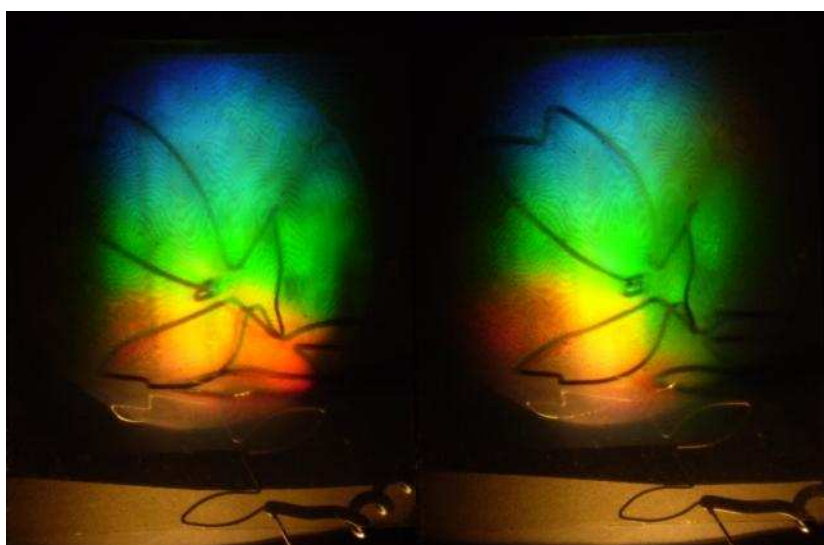


Figura 4.7: Par estéreo obtido com uma tela holográfica simples de curta distância focal com um sistema de holoprojeção com fonte linear. À direita a vista direita e à esquerda a vista esquerda do par estéreo.

Capítulo 5

Gravação de Telas Holográficas com extensão de campo vertical

5.1 Tela holográfica horizontalmente dispersiva

A Figura 5.1 mostra o esquema utilizado na montagem para obtenção de uma tela holográfica com difusor na posição vertical. O feixe colimado de um laser de He-Ne com 30 mW (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M). O feixe referência atinge o filtro espacial (SP), que é formado por uma objetiva de microscópio de 20x com um orifício de $25\text{ }\mu\text{m}$. O feixe objeto chega a uma lente cilíndrica (CL), de distância focal 3,8 mm, originando uma linha que diverge até um difusor (D), composto de três camadas de plástico fino presas entre duas placas de vidro. A linha difusora tinha 2 mm de espessura e 200 mm de comprimento. Como cada ponto de D é difusor, cada ponto ilumina todo o filme holográfico (HF). O filme empregado foi o mesmo Agfa 8E75 HD e o ângulo entre os feixes foi de 45° . As distâncias utilizadas foram $D\text{-HF} = (70 \pm 2)\text{ cm}$, $CL\text{-D} = (20 \pm 1)$ e $SP\text{-HF} = (237 \pm 3)\text{ cm}$. A Figura 5.2 mostra a distribuição de intensidades gerada pelo difusor no plano do filme HF.

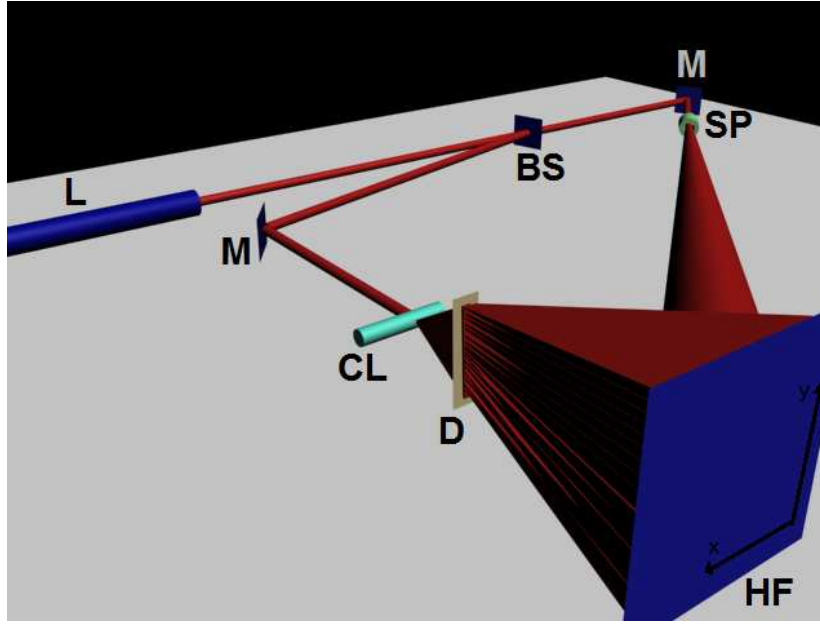


Figura 5.1: Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica horizontalmente dispersiva, usando um feixe direto e um difusor vertical. O feixe colimado de um laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M). O feixe referência atinge o filtro espacial (SP) e o feixe objeto chega a uma lente cilíndrica (CL) originando uma linha que diverge até um difusor (D). Cada ponto iluminado de D ilumina todo o filme holográfico (HF). HF também é iluminada pelo feixe que vem de SP.

Com esta montagem, minimizamos a diferença de caminho óptico Δl entre os feixes de tal forma a reduzi-la a quase zero no centro da tela e menor que o comprimento de coerência do laser em questão (1 m) para dois pontos quaisquer na tela (eq.2.1). Ambos os feixes possuíam a mesma polarização, condição necessária para a interferência [55].

O procedimento no processamento químico utilizado na revelação e no branqueamento das telas holográficas é apresentado no Capítulo 6.

5.2 Tela holográfica verticalmente dispersiva

A Figura 5.3 mostra o esquema utilizado na montagem para obtenção de uma tela holográfica com difusor na posição horizontal. O feixe colimado de um laser de He-Ne com 30 mW (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe

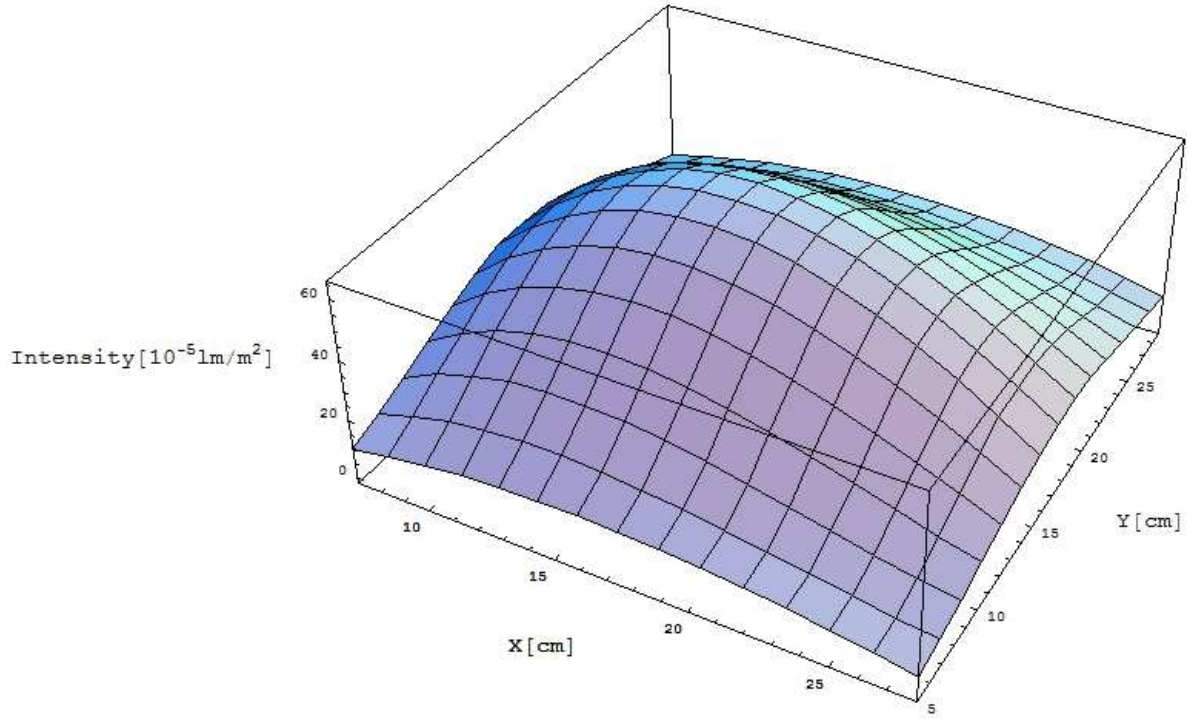


Figura 5.2: Distribuição de luz gerada pelo difusor na posição do filme.

é então refletido por um espelho plano (M). O feixe referência atinge o filtro espacial (SP), que é formado por uma objetiva de microscópio de 20x com um orifício de $25 \mu\text{m}$. O feixe objeto chega a uma lente cilíndrica (CL), de distância focal 3,8 mm, originando uma linha que diverge até um difusor (D), composto de três camadas de plástico fino presas entre duas placas de vidro. A linha difusora tinha 6 mm de espessura e 200 mm de comprimento, esta pequena diferença de espessura da linha difusora, comparada com a HDHS, aumenta o campo de observação e foi obtida agregando uma lente divergente (DL) perto de CL. Cada ponto iluminado de D ilumina todo o filme holográfico (HF). O filme empregado foi o mesmo Agfa 8E75 HD e o ângulo entre os feixes foi de 45° . As distâncias utilizadas foram $D\text{-HF} = (58,5 \pm 0,5) \text{ cm}$, $CL\text{-D} = (29 \pm 1) \text{ cm}$ e $SP\text{-HF} = (237 \pm 3) \text{ cm}$.

A Figura 5.4 mostra as dimensões do difusor e lentes envolvidas na gravação.

Com esta montagem, minimizamos a diferença de caminho óptico Δl entre os feixes de tal forma a reduzi-la a quase zero no centro da tela e menor que o comprimento de

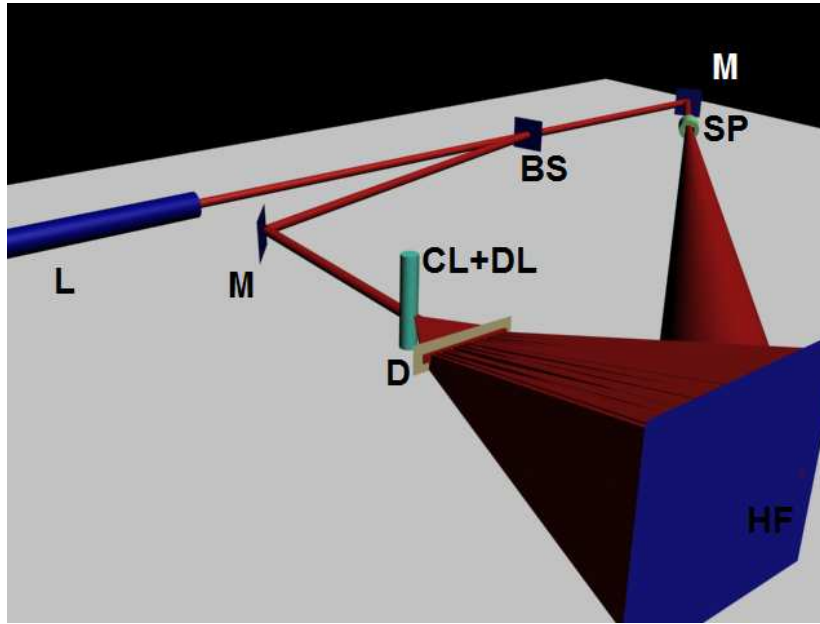


Figura 5.3: Esquema utilizado na montagem para a obtenção de uma tela holográfica verticalmente dispersiva, usando um feixe direto e um difusor horizontal. O feixe colimado de um laser (L) é dividido em dois por um divisor de feixes variável (BS), cada feixe é então refletido por um espelho plano (M). O feixe referência atinge o filtro espacial (SP) e o feixe objeto chega a uma lente cilíndrica (CL) originando uma linha que diverge até um difusor (D). Uma lente esférica divergente (DL) aumenta a divergência do feixe antes de chegar a D. Cada ponto iluminado de D ilumina todo o filme holográfico (HF). HF também é iluminada pelo feixe que vem de SP.

coerência do laser em questão (1 m) para dois pontos quaisquer na tela (eq.2.1). Ambos os feixes possuíam a mesma polarização, condição necessária para a interferência [55].

O procedimento no processamento químico utilizado na revelação e no branqueamento das telas holográficas é apresentado no Capítulo 6.



Figura 5.4: As dimensões do difusor e lentes envolvidas na gravação.

5.3 Análise das telas holográficas com extensão de campo vertical e resultados experimentais obtidos

Depois de reveladas e branqueadas (Capítulo 6), as telas holográficas já têm determinados seus atributos: distância focal e eficiência de difração.

Para estudar a dependência da eficiência de difração com o comprimento de onda das telas holográficas com extensão de campo vertical fizemos uma série de medidas de eficiência utilizando o feixe colimado de dois lasers e coletando a luz difratada. Para as medidas usamos um laser de He-Ne e um laser de diodo semiconductor verde. Devido a dificuldade da medição na mesma área da tela, fizemos uma série de medidas iluminando diferentes partes de cada tela e estimamos a eficiência de difração média. A tabela 5.1 mostra os valores de eficiência obtidos para duas telas holográficas horizontalmente e verticalmente dispersivas.

Comparando os valores da tabela 5.1 podemos concluir que o efeito de seletividade

Tabela 5.1: Resultados experimentais na comparação das eficiências de difração em relação a ordem zero de duas telas holográficas com extensão de campo vertical

Tipo de tela	$\bar{\eta}$ para $\lambda=530$ nm	$\bar{\eta}$ para $\lambda=632$ nm
HDHS	7 ± 3 %	6 ± 4 %
VDHS	6 ± 4 %	4 ± 2 %

de comprimentos de onda por efeito Bragg é pequeno, inferior a 2%. Isto ocorre devido a pequena espessura da emulsão (Tabela 6.1) e pequeno Δn [62], modulação de índice de refração. Adicionalmente podemos considerar as eficiências estatisticamente iguais, levando em conta a variação estatística na incerteza.

As variações de eficiência de difração refletidas pelas incertezas de cada medida da tabela 5.1 mostram uma desuniformidade na área de toda a tela. Esta não-uniformidade, inferior a 4%, é o resultado da diferença de caminho óptico dos feixes não ser igual a zero em todas as partes e/ou uma limitação no comprimento de coerência do laser usado na gravação. Fora da região central, onde Δl não é igual a zero ocorre uma diminuição do contraste das franjas que resulta numa perda de eficiência de difração.

As melhores eficiências de difração encontradas para as telas HDHS e VDHS e suas respectivas áreas são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Melhores eficiências de difração das telas holográficas com extensão de campo vertical

Tipo de tela	$\bar{\eta}$ [%]	Área [cm ²]
HDHS	$16,7\pm0,8$	1370
VDHS	$3,4\pm0,7$	1370

Analisando a Tabela 5.2, explicamos que a alteração significativa de eficiência de difração entre as telas ocorreu devido as diferentes condições de armazenamento dos filmes holográficos disponíveis. Os filmes Agfa 8E75 HD por já terem mais de 10 anos de armazenamento possuíam diferentes estados de conservação, alguns estando pré-expostos. Infelizmente da tela VDHS não foi possível gravar mais de uma tela, enquanto que a HDHS foi possível gravar três elementos deste mesmo tamanho.

A distância focal é medida iluminando com um feixe colimado a 45° o filme holográfico revelado e medindo a distância do ponto de focalização ao filme. O valor teórico de f foi encontrado utilizando a equação 2.1. Substituindo as distâncias experimentais, encontramos duas frequências espaciais para dois pontos distintos da tela, situados no plano $y=0$. Depois, pensando na reconstrução, iluminamos a tela com dois raios incidentes a 45° em cada um desses dois pontos da tela. Utilizando a equação 1.1, podemos descobrir a direção dos raios difratados. Com os ângulos de difração e com os pontos de incidência determinados no plano cartesiano, encontramos as duas equações das duas retas formadas pelos raios difratados. Igualando as coordenadas dependentes dos raios (coordenadas z 's) encontramos a coordenada x onde ocorre o cruzamento das retas. Finalmente, substituímos esse valor na equação de uma das retas para encontrar a distância z onde ocorrerá a intersecção, ou seja, a distância de focalização. O programa desenvolvido para esse cálculo é mostrado no Apêndice E. A equação 2.15, para determinação da posição da imagem, não leva a resultados satisfatórios devido a aproximação paraxial nela contida. Não conhecemos abordagem teórica para calcular distâncias focal sem aproximação paraxial que não seja por traçado de raios.

Os valores de f para as montagens apresentadas nesse capítulo são encontradas na Tabela 5.3

Tabela 5.3: Resultados das distâncias focais das telas holográficas com extensão de campo vertical

Tipo de tela	f medido [cm]	f teórico [cm]
HDHS	85 ± 2	82,2
VDHS	65 ± 2	66,8

A seleção do ângulo de 45° ocorre para evitar a superposição da ordem zero de difração com a primeira ordem, o que atrapalharia a visão do observador. O uso do difusor na HDHS aumenta o campo de observação vertical para 8 cm quando o observador se encontra a 2 m da tela em suas aplicações envolvendo luz branca. As telas holográficas simples (Capítulo 4) não oferecem mais de 1 cm considerando as mesmas distâncias

envolvidas.

Comparando a melhor HDHS obtida com os métodos apresentados neste capítulo com a maior tela gravada com laser pulsado de rubi [63], montamos a Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Comparação das telas obtidas com os métodos descritos nesta dissertação com uma tela obtida com laser pulsado

Tipo de tela	Tamanho [cm]	$\bar{\eta}$ [%]	f medido [cm]
HDHS - pulsado	78x111	$2,7 \pm 0,4$	92 ± 2
HDHS- seção 5.1	37x37	$16,7 \pm 0,8$	85 ± 2

Além destas características, a tela obtida com laser pulsado apresenta franjas circulares grandes causadas pela difração de um grão de poeira no circuito óptico e alto grau de difusão, devido provavelmente a resíduo químico dos processos de revelação e, mais provavelmente, branqueamento. Esta tela, devido a idade e umidade a qual está sujeita, já apresenta fungos que se alimentam da gelatina presente no filme holográfico. Esta difusão, espalhamento aleatório da luz, resulta em uma perda de resolução das imagens visualizadas com a tela e em uma iluminação da tela, prejudicando a translucidez. As telas descritas neste capítulo não apresentam franjas e um baixo grau de difusão.

Capítulo 6

Processamento químico na gravação das telas holográficas

Nesse capítulo 6, descreveremos os métodos utilizados no processamento químico do filme holográfico exposto para que este seja convertido em uma tela holográfica.

6.1 Introdução

6.1.1 Emulsão de Haleto de Prata

Por mais de cem anos as emulsões de haletos de prata tem sido usadas para gravação de radiação visível ou invisível em fotografia, cinematografia, astronomia e espectroscopia, fotografia com raio X e microscopia eletrônica, e em muitos outros campos onde a informação precisa ser armazenada.

Quando a luz coerente de um laser de He-Ne tornou-se acessível para holografia na década de 60, a emulsão fotográfica era o único material disponível que porporcionava a resolução necessária e a sensibilidade para a luz vermelha desse laser. Desde então muitos outros materiais foram desenvolvidos que permitem a gravação de várias partes do espectro [64], porém todos com menor sensibilidade.

Os materiais de haletos de prata tem longa tradição, são versáteis, estão disponíveis no mercado [65, 66] em diversos tamanhos e características, podem ser manuseados e revelados com um mínimo de equipamentos, e são aceitáveis para fazer hologramas de fase, amplitude, coloridos e Lippmann. Os primeiros haletos de prata criados eram de alta resolução e baixa sensibilidade. A necessidade de desenvolver materiais de maior sensibilidade levou a desenvolver filmes de grão mais grosso.

Características

Um *material fotográfico de haleto de prata* é baseado em um tipo, ou uma combinação de cristais de haletos de prata embutidos em uma camada de gelatina, comumente chamado de *emulsão fotográfica*. Geralmente a emulsão fotossensível não é verdadeiramente uma “emulsão”, mas uma fina camada de microcristais de haleto de prata dispersas em um coloide (gelatina). Existem três tipos de haletos de prata: cloreto de prata (AgCl), brometo de prata (AgBr) e iodeto de prata (AgI). O cloreto de prata é usado em emulsões de menor sensibilidade, emulsões mistas de AgCl e AgBr tem maior sensibilidade enquanto que as emulsões mistas de AgBr e AgI possuem ainda maior sensibilidade. O iodeto de prata nunca é usado isolado e quando e misturas apresenta-se em concentrações menores que 5%.

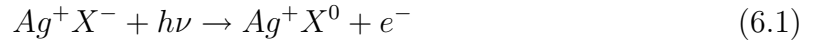
O valor típico do tamanhos dos grãos dos haletos de prata usados em holografia é de 0,08-0,03 μm . Entretanto a sensibilidade das emulsões de grãos finos é mais baixa. A probabilidade de absorção de um certo número de fótons é proporcional a área projetada do cristal e sua profundidade.

Um dos compostos presentes na gelatina que tem grande importância no processo de gravação são os compostos de enxofre instáveis que quando sujeitos a uma pequena mudança de temperatura se dissociam, produzindo sulfeto de prata (Ag_2S).

Formação da imagem latente

Chamamos de *imagem latente* em um filme fotográfico a um registro invisível produzido em um filme pela exposição a luz. Nos primeiros tempos da fotografia, o mecanismo de formação da imagem era desconhecida assim a imagem armazenada no filme era chamada de *latente* até ser revelada pelo revelador.

O cristal de haleto de prata é um fotocondutor tipo n com uma banda de valência de elétrons e com uma banda de condução na qual elétrons injetados estão livres para migrar para fora do cristal até ser capturado por um defeito da rede. Durante a exposição de uma emulsão, fótons são absorvidos pelo cristal. Quando um fóton de energia suficiente é absorvido, um elétron do cristal é promovido para a banda de condução, deixando para trás um buraco positivo que é um átomo halogênio livre:



onde Ag^+X^- é um cristal de haleto de prata.

Segundo a teoria de Mitchell [67, 68, 69, 70] o buraco foto-gerado é capturado por uma carga parcial S^{2-} de um grão de Ag_2S presente na gelatina. O resultado é uma partícula carregada Ag_2S^+ , que se dissocia em AgS e Ag^+ :



O íon de prata atrairá o elétron foto-gerado para formar o átomo de prata



Um átomo isolado de prata tem um tempo de vida médio de 1 segundo, que pode ser encontrado pelo tempo de vida na estatística de Boltzmann pela equação 6.4

$$t = \tau e^{E_0/kT} \quad (6.4)$$

onde $\tau = 10^{-12}\text{s}$ é o período de colisão estimada do elétron, $E_0 = 0,7\text{eV}$ é a energia necessária para remover o elétron, k é a constante de Boltzmann e $T = 300\text{K}$ é a temperatura.

Para criar um grão de imagem sub-latente no cristal de haleto de prata, onde uma molécula de prata diatômica é formada por processo de *nucleação*¹, um segundo átomo de prata é necessário no local do primeiro átomo durante seu tempo de vida:



O sub-grão de Ag_2 é estável na temperatura ambiente. Este grão de imagem sub-latente vai crescendo com absorções de mais fótons, resultando em elétrons foto-gerados. A *imagem latente* é geralmente tratada como uma coleção de alguns átomos em um local produzido pela redução de íons de prata no processo de *fotólise*². Prata formada desta maneira é chamada de prata fotolítica. A imagem latente de pelo menos três ou quatro átomos de prata é necessária para a ser revelável. Ser revelável significa a formação de uma imagem latente que tem a propriedade catalítica de aumentar a taxa de revelação de grãos de haleto de prata reduzidos a prata metálica por um agente redutor chamado *revelador*.

6.1.2 Filme Agfa-Gevaert 8E75 HD

Os produtos Agfa-Gevaert foram manufaturados na Bélgica até a década de 90, onde materiais holográficos eram uma parte da linha de produtos NDT (Linha de teste não-destrutivo). Os materiais holográficos da Agfa foram um dos que tiveram maior uso e os que apresentaram melhores resultados em holografia, além de que possuem muitos artigos e trabalhos onde são descritos [71]. A tabela 6.1 mostra as características do

¹A nucleação é a etapa em que as moléculas do soluto dispersas no solvente começam a se juntar em clusters, em escala nanométrica.

²A fotólise é a dissociação de moléculas por efeito da radiação electromagnética.

filme empregado nas gravações das telas holográficas apresentadas nesta tese:

Tabela 6.1: Características do Filme Holográfico Agfa-Gevaert 8E75 HD

Material	Espessura da emulsão [μm]	Sensibilidade espectral [nm]	Sensibilidade [μJ/cm ²] a 633 nm	Poder de resolução [ℓ/mm]	Tamanho do grão [nm]
8E75 HD	5	<750	10	< 5000	44

6.2 Processo de Revelação das telas holográficas

Revelação é o processo de transformação da imagem latente registrada no filme fotográfico em imagem visível através de processo químico. Tecnicamente isto acontece quando todos os grãos de haleto de prata expostos a luz são convertidos em prata metálica pela ação de um revelador químico. Pela simples exposição a luz, apenas pequenos grãos são convertidos em prata metálica; com o uso do revelador ocorre uma amplificação de 10^9 nesse processo.

A função da Solução A da Tabela 6.2 é oxidar para fornecer elétrons para a redução da prata no processo 6.3. A equação abaixo esquematiza o processo:



O Pirogalol em especial causa um efeito de endurecimento da gelatina e causa um efeito de coloração na emulsão, que é efetivo na redução de ruídos. Como o Pirogalol só é estável em soluções ácidas e o efeito de revelação necessita de um meio básico, necessitamos adicionar a solução um alcalino médio para aumentar o pH até aproximadamente 8,2; este é o papel da solução B da Tabela 6.2.

O processo de revelação química do filme nas gravações apresentadas na Parte III empregou duas soluções que devem ser combinadas em igual proporção imediatamente antes da revelação [72]. A Tabela 6.2 mostra a composição das soluções.

Tabela 6.2: Revelador para filme holográfico Agfa-Gevaert 8E75 HD

Solução A	Solução B
Pirogalol - 10g	Carbonato de sódio - 60g
Água destilada - 1 litro	Água destilada - 1 litro

O tempo de revelação é de 2 min e a temperatura era mantida entre 20 e 23°C. Após esse tempo o filme deve ser lavado em água corrente por mais dois minutos. Se busca uma densidade óptica [73] de 2,3, ideal para o filme holográfico Agfa 8E75 HD.

6.3 Processo de Branqueamento das telas holográficas

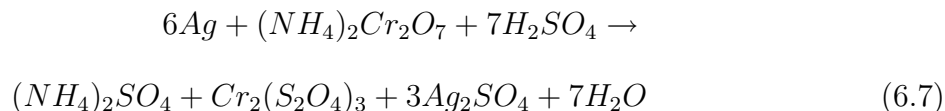
O *branqueamento* é o processo de conversão da imagem em prata produzida durante a revelação em um solúvel em água ou um composto de prata insolúvel.

O branqueamento é o processo reverso da revelação. Durante a revelação um íon de prata é reduzido a prata livre enquanto que durante o branqueamento, prata metálica é oxidada em um íon de prata. Na prática, a revelação só pode acontecer em meios básicos e o branqueamento só pode acontecer em meios ácidos.

Utilizamos nessa tese um processo de branqueamento em duas etapas. Primeiro um banho de dicromato e após este um banho em permanganato, ambos em meio ácido.

O dicromato $Cr_2O_7^{2-}$ tem valência alta e na presença de ácido sulfúrico, prontamente cede seu excesso de oxigênio para oxidar a prata. É um agente moderadamente rápido. Sais de cromo tem a propriedade de formar complexos com a gelatina, tornando-a mais dura. Este endurecimento é desejado em hologramas de fase, caso das telas holográficas.

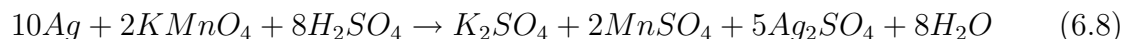
O dicromato de amônio, na presença de ácido sulfúrico, reage da seguinte forma:



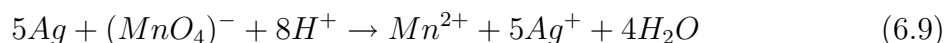
Desta forma a prata metálica é removida. Banhos de dicromato são bastante corrosivos e podem causar dermatites.

O permanganato MnO_4^- também tem valência alta e na presença de ácido sulfúrico, prontamente cede seu excesso de oxigênio para oxidar a prata. O permanganato causa pouco efeito na gelatina. Na prática utilizamos esse segundo banho para reforçar o branqueamento e ajudar a remover o $Cr_2(S_2O_4)_3$, de cor amarelada, adsorvida no filme.

O permanganato de potássio, em meio ácido, age na prata da seguinte forma:



ou ionicamente



Em ambos os banhos deve-se utilizar água destilada para evitar os haletos solúveis porque estes reagem com o sulfato de prata (equação 6.8) para formar sulfato de cloro, que amarela a emulsão.

A Tabela 6.3 mostra os branqueadores empregados.

Tabela 6.3: Branqueador para filme holográfico Agfa-Gevaert 8E75 HD

1º Branqueador	2º Branqueador
Dicromato de amônio - 3g	Permanganato de potássio - 0,8g
Ácido sulfúrico - 1,5 ml	Ácido sulfúrico - 10 ml
Água destilada - 1 litro	Água destilada - 1 litro

O tempo do 1º branqueamento, quando o filme revelado encontra-se na densidade óptica ótima (2,3) é de aproximadamente 2 min. O filme deve ser mantido imerso e em constante movimento até que claree completamente.

Entre cada uma das etapas do branqueamento o filme deve ser lavado em água corrente por dois minutos. Como último passo do processo, o filme é introduzido em um líquido umectante e posteriormente seco utilizando um secador de cabelo comercial.

6.3.1 Comparação entre dois processos químicos utilizados

Durante a tese foi feito uma comparação entre dois processos de revelação que utilizam diferentes agentes reveladores, o revelador apresentado nessa tese e o tradicional processo apresentado em [74]. Utilizando o processo descrito neste capítulo, obtivemos em média +2% de eficiência nas telas gravadas. Essa diferença foi medida gravando telas em mesmas condições e revelando de maneira diferente.

Parte IV

Aplicações

.

Capítulo 7

Sistema de Holo-televisão com plano único

Neste capítulo descrevemos a aplicação da tela holográfica que teve maior êxito, trata-se de um sistema que gera uma imagem animada flutuando a frente da tela. Este trabalho foi publicado em [50].

Este trabalho contou com a colaboração do Prof. Dr. Rolando L. Serra Toledo, Prof.^a Dr.^a Noemí I. Rodriguez Rivera além de alunos de iniciação científica como Maria C. I. Amon e Marcelo Rigon.

7.1 Introdução

Um esforço para o desenvolvimento de uma televisão tridimensional tem sido feito nos últimos anos. TV 3D está sendo transmitida no Japão pela primeira vez no mundo para ser visualizada com óculos específicos em um receptor LCD especial como o da Hyundai [75]. Tem sido mostrado que o uso regular destes equipamentos causa fadiga [76]. Monitores 3D que não necessitam de óculos ainda não tem qualquer capacidade televisiva. Um projeto europeu de captura de imagens 3D para televisão tem estado funcional desde setembro de 2004 [77] mas ainda não tomou a direção de nenhum sistema

específico. Na Coréia, um constante esforço de criação de jogos eletrônicos e animações 3D vem sendo aumentado gradualmente [78].

Sistemas 3D que constroem um padrão de franjas de interferência para difratar ainda não conseguem representar uma cena de TV [79, 80, 81]. Sistemas alternativos propostos apresentam o inconveniente da necessidade de rastrear a posição do observador [82], portanto sendo válido apenas para um observador.

Mostradores feitos de polímeros fotorefrativos [83, 84] oferecem um material de gravação holográfico dinâmico que permite a atualização de imagens mas a baixa taxa de variação de quadros onde cada cena estática completa demora cerca de 2,5 min para ser gravada, tornando sua aplicação ainda impossível para uma cena animada.

Telas holográficas tiveram suas aplicações estendidas para múltiplas projeções e sistemas de luz branca [85, 8]. As telas holográficas horizontalmente dispersivas (HDHS) permitem a decodificação em luz branca de uma imagem previamente codificada [9, 13, 86] (Seção 1.4). Um sistema previamente descrito em [87] mostra capacidade para permitir transmitir imagens de TV para serem visualizadas em paralaxe horizontal contínua (HPO) sem necessidade de óculos ou informação da posição do observador, para até três observadores simultâneos em diferentes níveis de altura. HPO é uma aproximação efetiva para a paralaxe completa porque os humanos percebem o relevo usando movimentos horizontais dos olhos.

Uma imagem volumétrica foi criada pelo fatiamento de uma animação 3D em planos que aparecem atravessando a tela [87]. Os planos eram deslocados sequencialmente por espelhos controlados eletronicamente por motores de passo de alta velocidade controlados por computador. Quando reduzimos os muitos planos para apenas um, a possibilidade de utilização de um sistema simplificado de televisão de um único plano nos foi evidente. A imagem resultante não parece uma imagem plana “chapada”, mas por se encontrar flutuando a frente da tela em um plano oblíquo leva o observador a ter a sensação de estar vendo uma imagem com volume.

Neste capítulo descreveremos um sistema simplificado de Holo-Televisão baseado em um primeiro processo de difração por uma rede de difração e em um segundo processo em uma tela holográfica horizontalmente dispersiva. A profundidade da imagem é medida e alguns importantes resultados para este sistema holo-televisivo são apresentados.

7.2 Descrição

Usando uma rede de difração como codificadora espectral de profundidade (seção 1.4) para projetar uma imagem 2D, esta imagem pode ser localizada em frente, atrás [13] ou estar oblíqua a tela [88].

A Figura 7.1 mostra o esquema do sistema, onde um projetor (PJ) focaliza a imagem próximo¹ de uma rede de difração (DG) e a primeira ordem é projetada por uma objetiva (OL) na tela holográfica (HS), usada em modo de reflexão. A imagem obtida (I) se observa a frente da tela. Esta imagem também pode ser vista por transmissão através da tela.

A largura do borrão espectral que chega a tela, que é uma consequência da distância da imagem focalizada à rede de difração, determinará a profundidade de formação da imagem I.

A imagem projetada na rede era enviada para um projetor (PJ) por um computador ajustado para a resolução de 640 x 480 pixels. O projetor multimídia utilizado foi o Sharp XG-H400U, com a lente projetora retirada e invertida para focalizar a imagem mais próxima do mesmo. A rede de difração (DG) possuía 1000 linhas/mm com eficiência de difração de $(13 \pm 1)\%$, a objetiva Pentax Takumar 1:2.8 (OL) tinha de 90 cm de distância focal. A tela holográfica (HS) usada foi uma HDHS com eficiência de difração $(23 \pm 1)\%$, focal de (64 ± 1) cm e área de 1370 cm^2 . As distâncias envolvidas foram PJ-DG=21,5 cm, DG-OL=8 cm e OL-HS=171,8 cm.

¹Esta distância está relacionada com posição final da imagem, como é explicado na seção 1.4

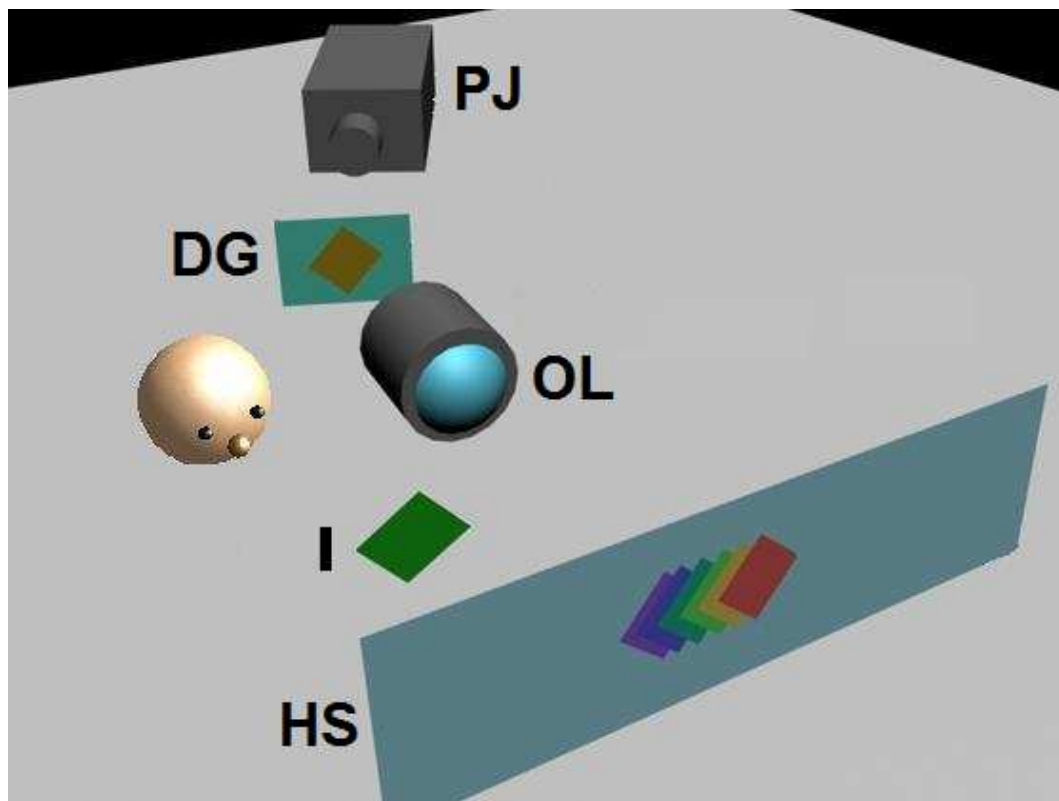


Figura 7.1: Esquema da montagem do sistema de HoloTV de plano único.

7.3 Resultados e Análise

Na Figura 7.2 observamos uma imagem de vídeo e suas visualizações utilizando o sistema descrito. Estas imagens foram capturadas usando uma câmera digital não-profissional modelo Olympus X-760. O resultado fotográfico é muito mais pobre que o efeito experimentado na visualização direta.

A imagem pode ser visualizada de duas maneiras distintas: pela ordem de difração refletida ou pela transmitida pela tela. A eficiência de difração é quase a mesma para os dois casos. No nosso caso específico escolhemos a ordem refletida devido ao espaço disponível no laboratório.

Para encontrar a posição da imagem usamos um bastão como referência. A câmera é colocada na posição de cada um dos olhos de um observador. Deslocando o bastão, onde ele estiver na mesma linha que um ponto selecionado da imagem para ambos os



Figura 7.2: À esquerda a imagem do vídeo projetado no sistema de HoloTV. Ao centro a imagem correspondente a cena da esquerda. À direita outra cena do mesmo vídeo.

olhos, a posição da imagem é encontrada.

A Figura 7.3 mostra a posição quando ambos os olhos observam o bastão alinhado com a perna do homenzinho visto na imagem. A distância medida da imagem a tela foi de $(27,0 \pm 0,5)$ cm, encontrada a frente da tela. O campo de observação do observador a 140 cm da tela era de (24 ± 1) cm, o que corresponde a um campo angular de $11 \pm 1^\circ$.



Figura 7.3: À esquerda a imagem vista pelo olho esquerdo e à direita a imagem visualizada com o olho direito. A comparação entre a imagem e o bastão mostra que a distância da imagem é 27 cm a frente da tela.

A imagem observada possui paralaxe horizontal contínua e devido a mudança de comprimentos de onda não ser suficiente para manter a mesma cor, em cada ponto de observação aparece em uma cor diferente. A imagem esquerda da Figura 7.3 pode ser vista em verde enquanto que a imagem da direita em azul [89, 90].

Para esta aplicação é importante o uso de telas de maior tamanho porque permite a projeção de imagens maiores. Também é mais confortável para o observador ter um maior campo vertical, assim empregamos a tela holográfica horizontalmente dispersiva.

7.4 Conclusão

Apresentamos neste capítulo um sistema capaz de projetar uma animação de computador ou uma cena de vídeo em uma tela holográfica horizontalmente dispersiva para obter uma imagem com paralaxe horizontal contínua que resulta a frente da tela. Imagens coloridas podem ser obtidas utilizando três projetores em sincronia RGB sobrepostas na mesma tela [91] (Capítulo 8).

Capítulo 8

Sistema de Holo-televisão com plano único a cores

Neste capítulo apresentamos os primeiros resultados experimentais de um sistema de HoloTV a cores, desenvolvido durante a tese de doutorado. O sistema trata de estender a ideia da HoloTV de plano único (Capítulo 7) para um sistema com tripla projeção superposta sobre a tela holográfica. O resultado é uma imagem flutuando a frente da tela em cores.

Para a realização deste trabalho contamos com a colaboração do Prof. Dr. Flávio C. Cruz e a Dr.^a Giovana T. Nogueira do Departamento de Eletrônica Quântica do IFGW da Unicamp e da aluna de iniciação Maria C. I. Amon do Laboratório de Holoimagens.

8.1 Introdução

Um dos inconvenientes da HoloTV de plano único (Capítulo 7) é a falta de cores reais na imagem observada. O observador vê uma cor diferente na imagem a cada posição sua na frente da tela holográfica.

Para a visualização de uma imagem a cores poderíamos utilizar três projetores cada um em uma cor primária (vermelho, azul e verde), os quais serão combinados em di-

ferentes direções angulares na projeção em tela holográfica. Teríamos, dessa forma, a formação de imagem colorida por tricromia. A técnica segue um procedimento similar que foi utilizado na construção de hologramas coloridos com a técnica de Benton [92, 93].

Abaixo descrevemos os resultados para um ponto imagem reconstruído com a técnica desenvolvida.

8.2 Descrição

8.2.1 Imagem bicromática obtida com Laser Ti:Sa e fibra fotônica

Como primeira etapa do trabalho utilizamos a luz colimada de um laser Titânio:Safira mode-locked na saída de uma fibra fotônica para gerar um ponto bicromático a frente da tela. Na saída da fibra, após ser atenuada, a potência era de 10 mW. A fibra fotônica [94] (Figura 8.1) tem a propriedade de gerar super-contínuo, resultando em um feixe policromático quase branco, como pode ser visto na Figura 8.2 após ser difratado por uma rede.

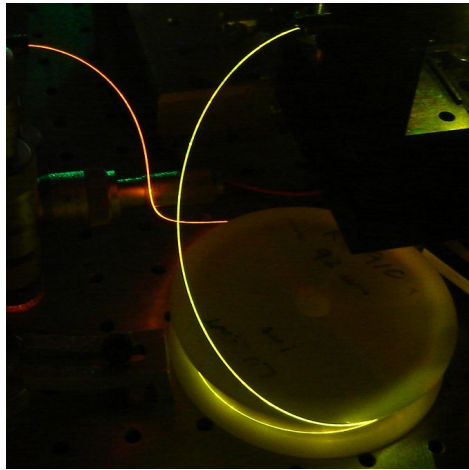


Figura 8.1: Fibra fotônica (*photonic crystal fibre*) utilizada para gerar um ponto bicromático com a Tela holográfica

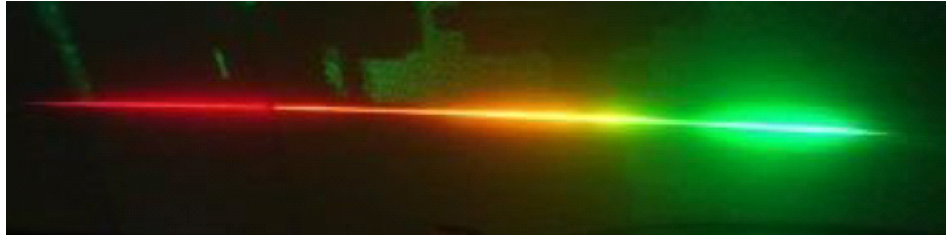


Figura 8.2: Espectro produzido pelo feixe de Ti:Sa após passar por uma fibra fotônica e ser difratado por uma rede de difração.

Na Figura 8.3, o observador está posicionado à frente da tela holográfica, a uma distância de aproximadamente 2 m. O feixe branco, após sair da fibra fotônica é dividido em dois por divisores de feixe (BS), sendo que cada feixe corresponderá à imagem de um ponto (para um observador fixo) após ser decodificado pela tela holográfica. Fazendo a superposição dos dois pontos, o observador verá a soma da cor dos dois feixes, o que caracteriza uma bicromia. A distância entre as redes e a tela era de 194 cm. A tela utilizada tinha 15 x 15 cm de distância focal 30 cm. As redes possuíam 1000 linhas/mm e eficiência de 13%.

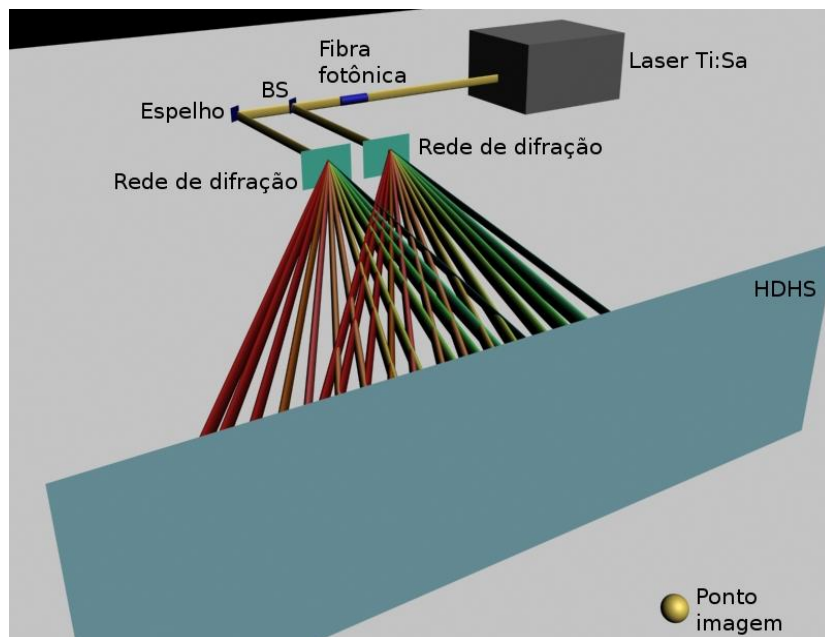


Figura 8.3: Sistema utilizado para formação de um ponto imagem bicromático à frente da tela. BS é um divisor de feixes.

8.2.2 Imagem tricromática obtida com projetores

Utilizando três projetores de diapositivas, ajustamos a inclinação e a distância deles de maneira a sobrepôr na tela holográfica a imagem. A Figura 8.4 mostra o sistema. O *slide* projetado em cada um dos projetores era um círculo com diâmetro de 0,5 mm.

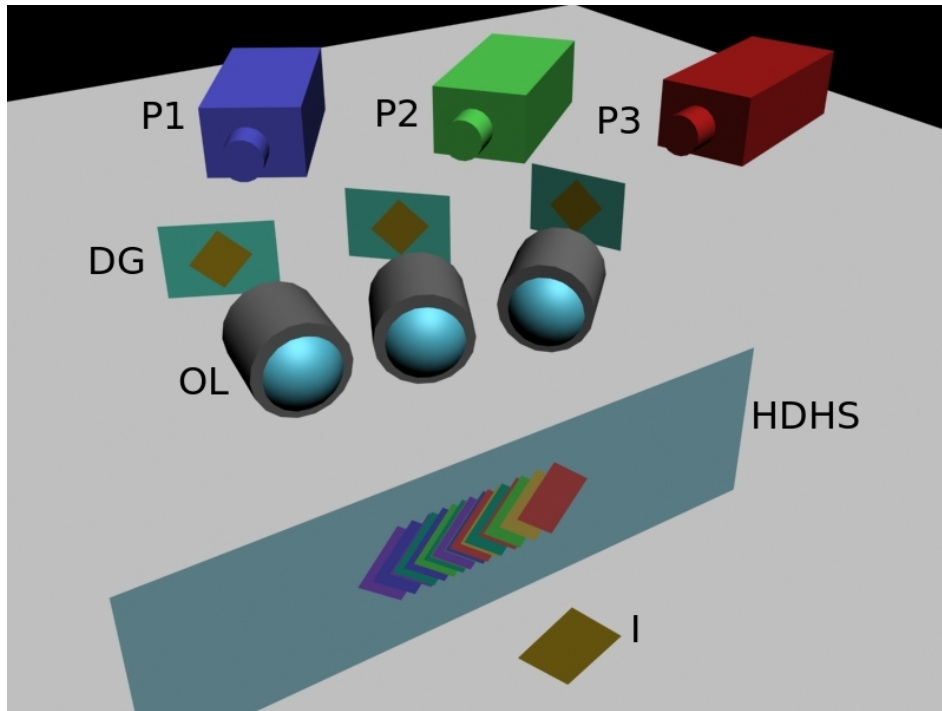


Figura 8.4: Sistema de HoloTV de plano único colorido.

Foi utilizada uma HDHS de 15 x 15 cm de distância focal 30 cm, e três redes de difração (DG) de 1000 linhas/mm e eficiência de 13%. Cada um dos projetores (PJ) foi ajustado de tal forma que para uma posição fixa do observador cada ponto fosse visto em uma das cores: vermelha, verde e azul.

8.3 Resultados

8.3.1 Resultados da imagem bicromática

A Figura 8.5 mostra a visão do olho esquerdo de um observador. Quando se alterna cada um dos feixes que chega à tela holográfica (Figura 8.3) se observa o ponto verde

ou vermelho. Quando deixamos ambos feixes liberados se pode ver a superposição da imagem de cada ponto, resultando em um ponto amarelo, que é a combinação de dadas cores.

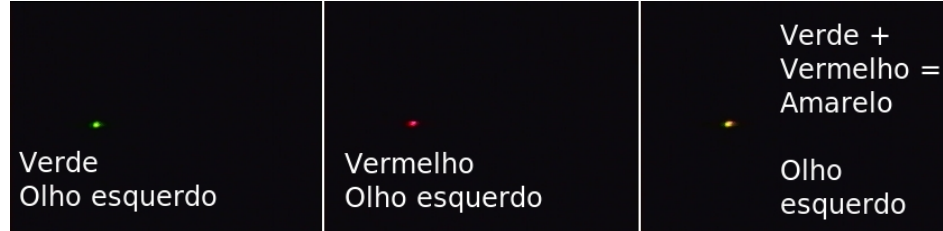


Figura 8.5: Superposição dos pontos vermelho e verde resultando em um ponto amarelo.

A Figura 8.6 mostra a diferença de paralaxe com que a imagem do ponto amarelo é visto por cada olho de um observador. Comparando a posição do ponto com as bordas da imagem (borda da tela) se percebe uma diferença de distância, o que prova que a imagem não se encontrava no plano da tela. O ponto de cima corresponde à visão do olho direito e a de baixo à do olho esquerdo. A distância medida da imagem à tela foi de $35,5 \pm 0,5$ cm e a distância entre observador (posição de onde foram tiradas as fotos) e tela era de 214 cm.

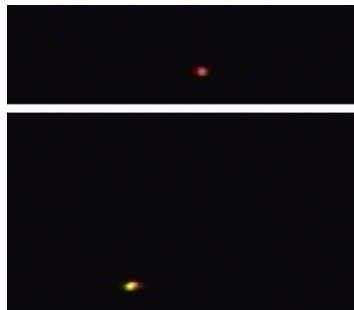


Figura 8.6: Diferença de paralaxe na visão de cada um dos olhos. O ponto de cima corresponde a visão do olho direito e a de baixo a do olho esquerdo.

8.3.2 Resultados da imagem tricromática

Na Figura 8.7 vemos as imagens dos pontos, que resultam em círculos de 1 cm de diâmetro, $10,0 \pm 0,5$ cm em frente à tela. Na figura vemos a imagem gerada por cada um

dos projetores individualmente, depois tomados dois a dois e finalmente todos juntos, gerando a imagem branca. A superposição cromática permite a utilização do sistema para gerar imagens coloridas por tricromia.



Figura 8.7: Na primeira linha vemos as imagem gerada por cada um dos projetores individualmente, abaixo tomados dois a dois e finalmente todos juntos, gerando a imagem branca.

Com o resultado mostrado na formação de imagens por tricromia de um círculo de 1 cm de diâmetro, somos levados a generalizar a ideia para imagens complexas e projetar, utilizando projetores multimídia, cada uma das componentes RGB separadamente. A Figura 8.8 esquematiza a ideia, que ainda não foi realizada experimentalmente.

Devido a diferença angular nas projeções existe uma diferença horizontal no tamanho dos círculos, que foi desprezada neste momento. Quando tratando-se de imagens complexas, pode ser feita uma correção através de programas gráficos.

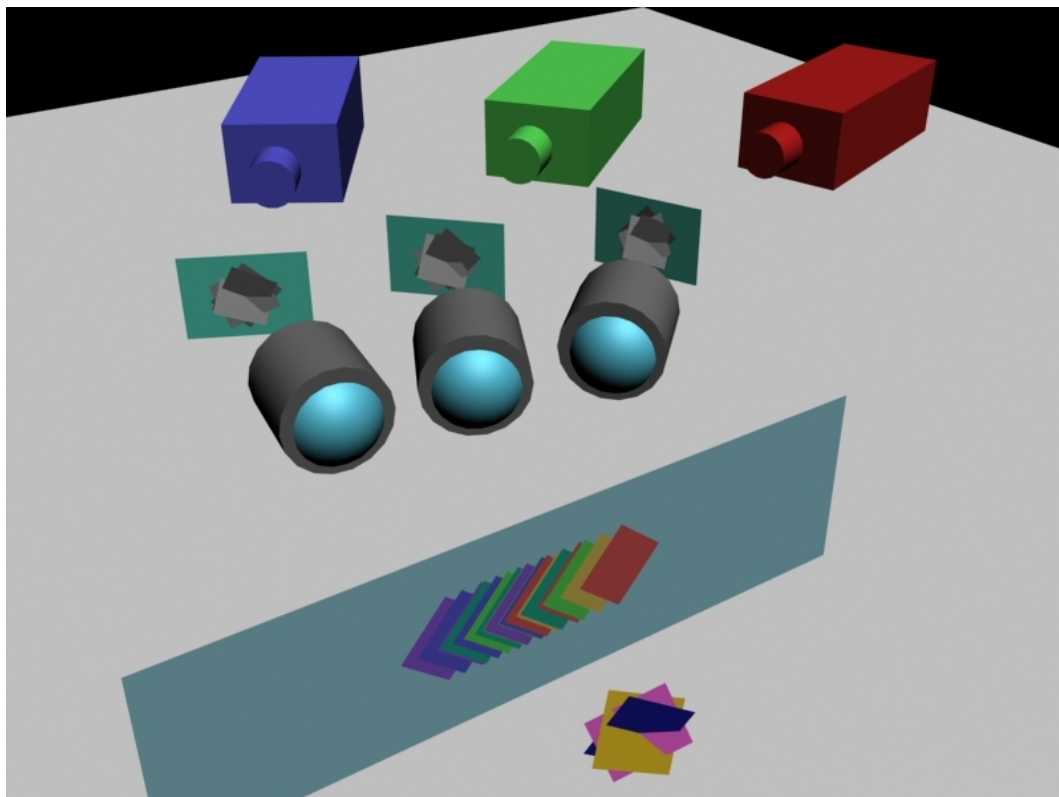


Figura 8.8: Projeção simultânea dos três componentes RGB de uma imagem complexa resultando em uma imagem colorida à frente da tela.

8.4 Conclusão

Com a demonstração experimental da formação de um ponto imagem colorido a frente da tela, mostramos que o sistema de HoloTV de plano único é capaz de produzir imagens, animações ou vídeos coloridas à frente da tela.

.

Capítulo 9

Estereoscópio com Tela Holográfica

Neste capítulo apresentamos uma aplicação inédita da tela holográfica, trata-se de sua aplicação como estereoscópio [95, 96]. A principal vantagem deste sistema é que ele não requer óculos ou qualquer equipamento adicional para a visualização de imagens tridimensionais.

Para a geração das imagens tomográficas estereoscópicas deste trabalho contamos com a colaboração do Prof. Dr. Alexandre Falcão do Instituto de Computação da Unicamp.

9.1 Introdução

A estereoscopia [97] permite a visualização em terceira dimensão completa, é uma técnica quase tão antiga quanto a fotografia e tem aplicações em fotografia, em cinema [98], em televisão [75] e em técnicas de levantamento geodésico, por exemplo. Esta técnica sempre necessita de óculos ou visores especiais que limitam os movimentos da pessoa que deseja alternar seu uso com a utilização de telas convencionais, como pode ser o caso de um cirurgião durante a cirurgia ou um operador de tráfego aéreo. Eliminar a necessidade do uso dos óculos torna mais higiênica a visualização para um número maior de pessoas porque evita o uso dos mesmos óculos para pessoas distintas ou é mais

econômico ao não ter que utilizar um óculos para cada observador.

As telas holográficas [8] são difusores direcionais difrativos onde o campo vertical de observação é estendido através do uso de um difusor durante sua obtenção (Capítulo 5).

Uma nova variante da tela holográfica, elemento que está em desenvolvimento desde 1987 [99, 86, 100] até a presente tese, oferece a possibilidade de sua utilização para a criação de imagens estereoscópicas a cores. O processo de produção desta nova tela é descrito na seção 5.2.

A seguir apresentamos a descrição do sistema óptico que forma o estereoscópio desenvolvido que permite a visualização de imagens tridimensionais sem o uso de qualquer dispositivo adicional e mostramos as imagens tomográficas obtidas com esse sistema.

9.2 Descrição

A tela holográfica verticalmente dispersiva (VDHS), quando iluminada por uma fonte pontual, projeta na posição do observador uma distribuição de luz que é a imagem holográfica do difusor utilizado na gravação. Na Figura 3.2 mostramos como uma VDHS posiciona esta imagem em função do comprimento de onda. Na figura, as imagens do difusor se sobrepõem somente de forma parcial para ilustrar melhor a situação, possibilitando o entendimento de que se o difusor usado fosse maior, a região de superposição seria também maior. É justamente dentro desta região de superposição que se pode ver uma imagem em suas cores reais com o estereoscópio.

Se colocamos um projetor de diapositivas ou um projetor multimídia no lugar da fonte pontual da Figura 3.2, um observador verá a imagem projetada sobre a tela, em suas cores reais, quando estiver na região branca mostrada pela figura.

Quando projetamos na mesma tela duas imagens, correspondentes a um par estéreo, a direcionalidade que produz a tela na difração permite que cada olho do observador

veja apenas uma das imagens. Esta característica possibilita que a tela holográfica verticalmente dispersiva seja usada como um sistema estereoscópico.

Na Figura 9.1 mostramos como devem ser colocados os dois projetores em incidência vertical, ou seja, de baixo para cima, para que cada olho do observador receba somente a imagem que provem de cada projetor. Para este fim utilizamos projetores Viewsonic modelo PJ503D, cada um com uma imagem distinta do par estéreo, como vemos na Figura 9.2. A imagem utilizada foi uma tomografia.

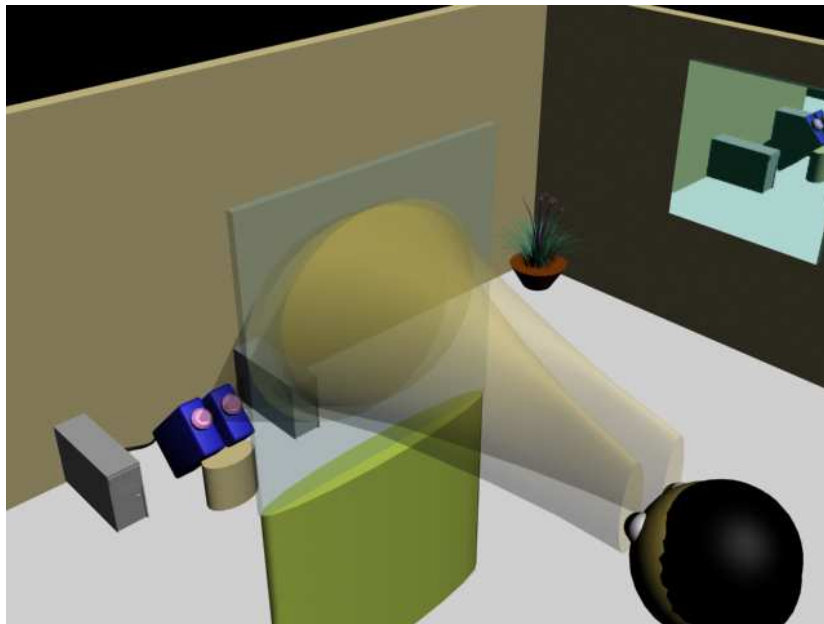


Figura 9.1: Projeção superposta na tela de dois projetores, cada um gerando um campo de vista diferente na posição do observador.

A Figura 9.3(a) mostra a distribuição luminosa que chega ao observador e a Figura 9.3(b) mostra uma visão do observador com referências para a identificação de tamanho da imagem visualizada.

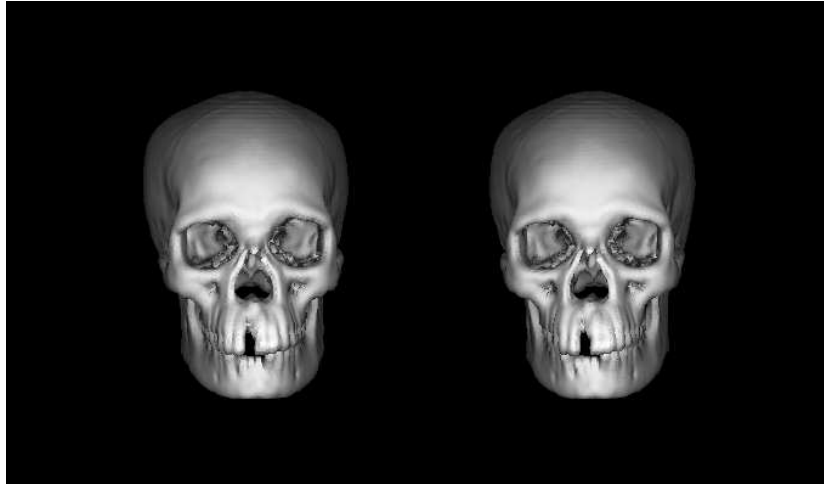


Figura 9.2: Par estereo projetado pelos projetores.

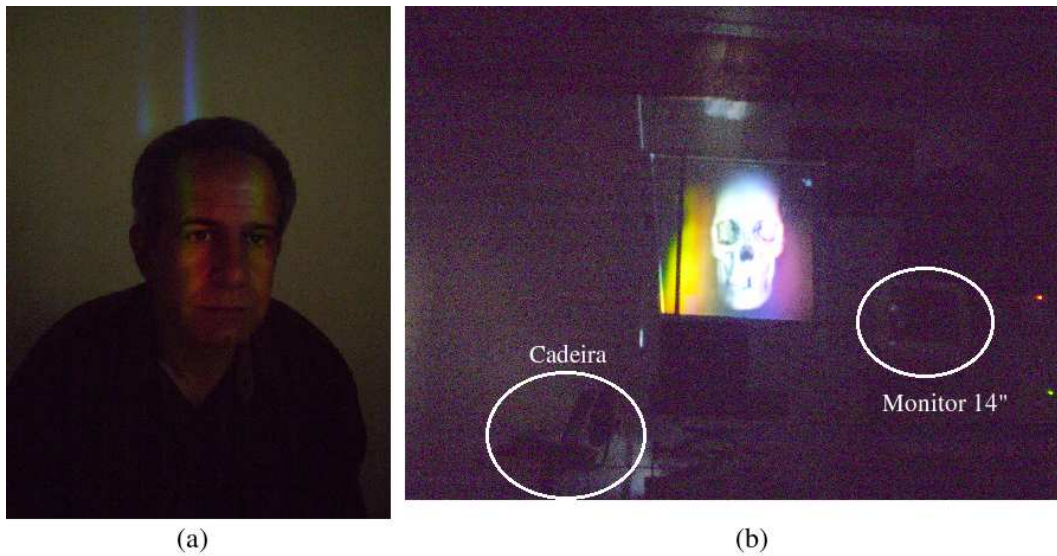


Figura 9.3: (a) A distribuição de luz que chega aos olhos do observador. (b) Uma visão do observador com referências para a identificação de tamanho da imagem visualizada.

9.3 Resultados e imagens obtidas

Com a distância focal obtida na gravação da VDHS (Tabela 5.3), o observador deve posicionar-se a aproximadamente 2 m da tela para que possa visualizar a imagem devidamente focalizada, estando os projetores a 1,3 m da tela. O observador situado a essa distância da tela poderá ver uma imagem em uma área efetiva de 1200 cm^2 . Os olhos do observador e o centro estavam a altura de 1,2 m. O campo de observação vertical

da imagem chega a 15 cm no branco.

Na Figura 9.4 mostramos o par estéreo da Figura 9.2 vista com a tela holográfica. Na Figura 9.4(a) se pode ver a perspectiva esquerda e na Figura 9.4(b) a perspectiva direita. Esta imagem é vista na cor branca, o que mostra que este estereoscópio é capaz de produzir imagens em cores. A visualização resultante é equivalente a de um bom estereoscópio, considerando a resolução limitada que dispomos no momento (800 x 600 pixels).

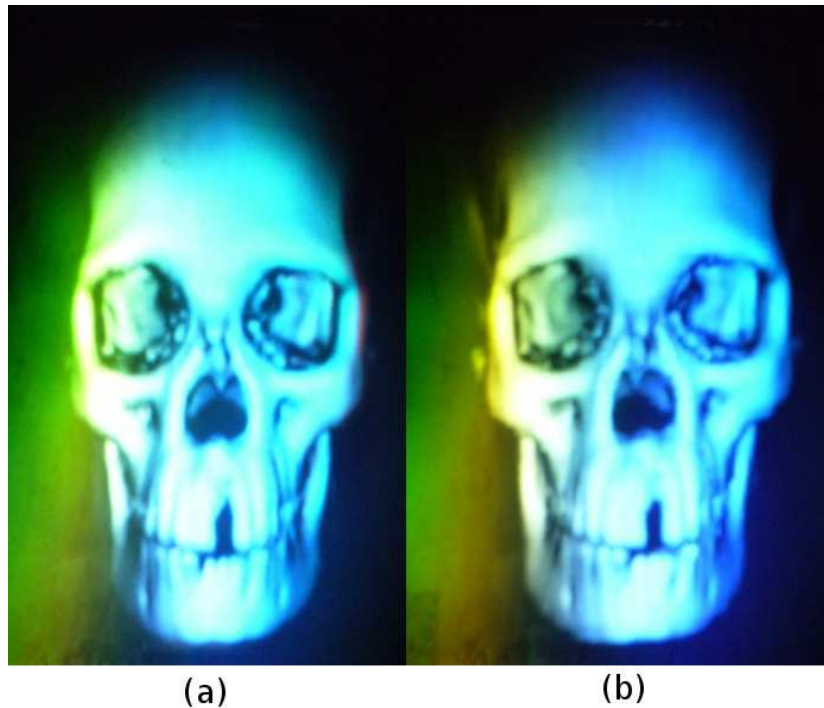


Figura 9.4: Perspectiva esquerda (a) e direita (b) do par estereo que é visualizado por um observador.

A diferença das projeções laterais dos projetores gera diferentes posições laterais para o campo do observador. A projeção oblíqua gera o efeito trapézio, facilmente corrigível pelos projetores, entretanto a obliquidade lateral gera um efeito de distorção diferenciado pequeno e que desprezamos nesse momento. Como em estereoscópios tradicionais, a paralaxe não é contínua, ou seja, a imagem não apresenta todas as perspectivas do objeto.

Se os projetores tivessem tele objetivas, ou se fossem construídas telas com menor

distância focal, o observador poderia estar mais perto da tela.

9.4 Conclusão

Utilizando uma tela holográfica verticalmente dispersiva foi possível obter um sistema estereoscópico gerador de imagens tridimensionais. Este sistema pode ser empregado para a visualização tridimensional de tomografias sem o uso de qualquer equipamento especial. A limitação do sistema está no reduzido campo horizontal (2 cm para cada olho) de visualização para o observador e a paralaxe não-contínua.

Capítulo 10

Holoprojeção de objetos usando um elemento difrativo e uma fonte linear

Neste capítulo descrevemos uma aplicação da tela holográfica simples, trata-se da holoprojeção de objetos usando um elemento difrativo e uma fonte linear, ou seja, na projeção das propriedades geométricas do objeto sobre a tela. A imagem resultante apresentada é tridimensional e tem paralaxe. Nos focamos nos resultados obtidos com as telas gravadas com os métodos apresentados nesta tese (Capítulo 4), pois o sistema foi descrito em [25].

Para este trabalho contamos com a colaboração de Dr^a. Noemí I. Rodriguez Rivera e de Prof. Dr. Rolando L. Serra Toledo.

10.1 Introdução

Neste sistema de holoprojeção, objetos são projetados sobre uma tela holográfica simples. O objeto é iluminado por um extenso filamento de uma lâmpada de luz branca. Obtendo imagens tridimensionais (3D) com profundidade normal (ortoscópica) do tipo

de uma sombra comum. A paralaxe continua e a perfeita nitidez são características da imagem que depende da extensão do filamento luminoso e das propriedades da tela empregada.

10.2 Descrição

O processo para obter imagens usando somente uma difração é descrito na Figura 10.1. f representa o filamento de luz branca do qual cada ponto é considerado emissor de raios de luz branca em todas as direções, por exemplo, o ponto f_{OD} . O ponto f_{OE} representa um ponto do filamento de onde divergem raios que atingem o objeto O_1 , fazendo uma sombra com respeito ao tamanho do objeto. Os raios que contornam ao objeto atingem a tela e difratam. A prolongação destes raios de um mesmo comprimento convergem na pupila do observador. O observador está localizado no mesmo lado dos raios e a imagem i_1 pode ser observada nitidamente pelo observador mais longe que a posição do objeto O_1 . O observador vê a imagem do objeto com um fundo de uma só cor e ela muda quando o observador move sua cabeça verticalmente.

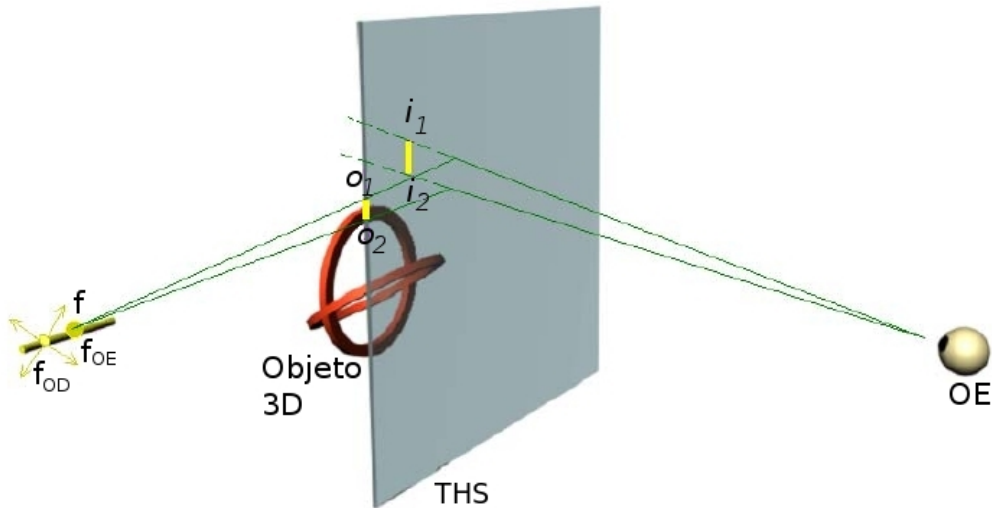


Figura 10.1: Esquema do sistema de holoprojeção utilizando uma tela holográfica simples (THS).

10.3 Resultados

Na Figura 4.7 vemos um par estéreo do objeto mostrado na Figura B.3. As imagens foram obtidas utilizando a tela holográfica simples de curta focal da Tabela 4.1. A Figura 10.2 mostra mais alguns exemplos de imagens obtidas. Estas imagens apresentam as seguintes características: profundidade normal, paralaxe continua, perfeita nitidez [25]. A extensão vertical das posições do observador é ampla o que permite observar a imagem de maneira agradável.

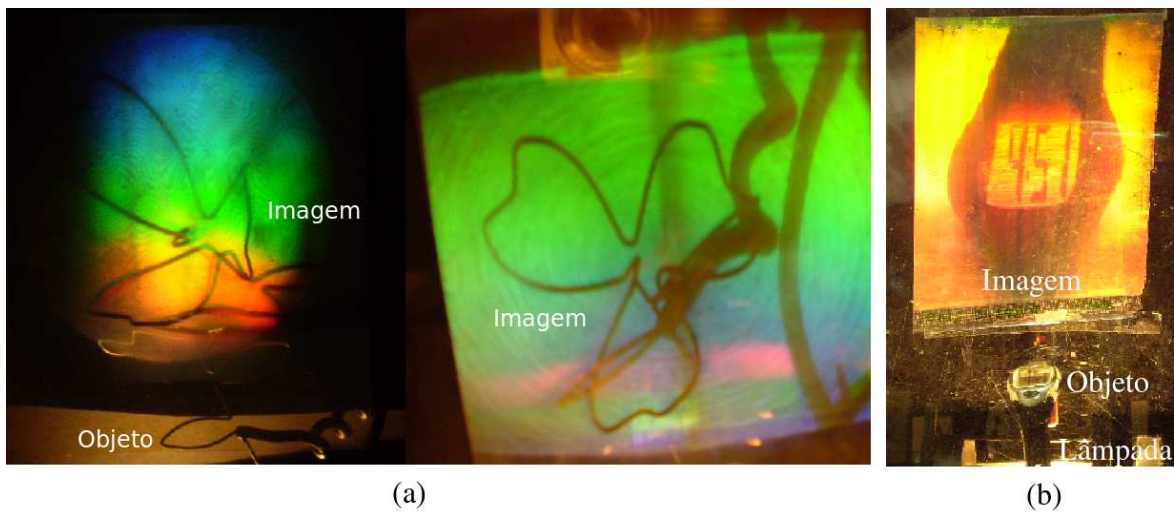


Figura 10.2: Imagens observadas com o sistema de holoprojeção com fonte linear. Com um objeto de arame (a) e com um mostrador de cristal líquido (b).

A principal contribuição para esta aplicação foi a melhora de eficiência de difração de $4,9 \pm 0,7$ % (melhor tela holográfica simples até então) para 51 ± 6 %, o que permitiu diminuir a potência das lâmpadas que iluminam o objeto.

10.4 Conclusão

Utilizando as telas holográficas simples gravadas com métodos apresentados nesta tese, foi possível melhorar em 10x a eficiência luminosa do sistema.

.

Parte V

Conclusões

.

Capítulo 11

Conclusões

No trabalho desenvolvido na construção de telas holográficas e suas aplicações foi possível chegar aos seguintes resultados:

- Desenvolvimento de um sistema para construção de Telas Holográficas Simples com o qual foram obtidas eficiências de difração em relação a ordem zero de até $34\pm4\%$ em telas de curta focal e telas de até 420 cm^2 utilizando dois feixes divergentes.
- Desenvolvimento de um sistema para construção de Telas Holográficas Horizontalmente Dispersivas com o qual foram obtidas telas de $16,7\pm0,8\%$ de eficiência e 1370 cm^2 . O aumento da eficiência, comparativamente com as telas prévias, foi de quase 10x, entretanto não foi possível chegar ao tamanho de 1 m^2 esperado.
- Desenvolvimento de um novo tipo de Tela Holográfica chamada de Verticalmente Dispersiva que chegou a $3,4\pm0,7\%$ de eficiência de difração em relação a ordem zero e 1370 cm^2 . Não se alcançaram eficiências maiores devido a problemas com o filme holográfico utilizado.
- Melhora da qualidade das imagens geradas no sistema de HoloTV de plano único com as telas holográficas horizontalmente dispersivas obtidas.

- Demonstração de que o sistema de HoloTV é capaz de gerar imagens coloridas por tripla projeção dos componentes tricrômicos da imagem.
- Melhora da eficiência de difração em quase 10x nas imagens geradas na holoprojeção com fonte linear com a utilização das Telas Holográficas Simples obtidas.
- Desenvolvimento de um sistema estereoscópico que utiliza a Tela Holográfica Verticalmente Dispersiva, conveniente para procedimentos de alta precisão que exigem visão tridimensional.
- Desenvolvimento de tratamento teórico para o cálculo de distâncias focais que demonstraram estar melhores com os valores experimentais que os tratamentos que utilizam aproximações paraxiais.

Parte VI

Referências Bibliográficas

.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Consortini. *Trends in Optics*, chapter 7. Academic Press, San Diego-USA, 1st edition, 1996.
- [2] D. Gabor. Sabemos que Gabor patenteou uma tela holográfica monocromática para observação de cinema estéreo, mas não achamos a referência a essa patente.
- [3] V. G. Komar; O. B. Serov. Art holography and holographic cinematography. In *Proc. of meeting Iskusstvo*, volume ch.I.6, page 141–143, Moscow, Russia, 1987. Russian Edition.
- [4] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*, chapter 9.6.4, pages 324–326. McGraw-Hill, Inc., 2nd edition, 1996.
- [5] D. Schweitzer. Pure colors with benton’s hologram. Personnal communication to J. J. Lunazzi, Feb. 1992.
- [6] S. McGrew. Light impressions. element on catalog from 1984 to 1992, 1984-1992. San Jose-CA-EUA.
- [7] J. J. Lunazzi. Holophotography, a complete stereo technique. In *Annual Meeting of the Society for Imaging Science and Technology-SPSE(IS&T)*, page 50, Boston-USA, 1989.

- [8] J. J. Lunazzi. Procédé et dispositif pour projeter et observer des images differenciees ou stereoscopiques, dessins, photographies, films cinematographiques ou video, 8907241 France, INPI-FR, 1992.
- [9] J. J. Lunazzi. 3d photography by holography. *Opt. Eng.*, 29(1):9–14, 1990.
- [10] J. J. Lunazzi. New possibilities in the utilization of holographic screens. In *Practical Holography VI*, volume 1667, pages 289–293, San Jose-CA-USA, 1992.
- [11] E. Elovaara; K. Engström; J. Nickels; A. Aito; H. Vainio. Biochemical and morphological effects of long-term inhalation exposure of rats to ethylbenzene. *Xenobiotica*, 15(4), 1985.
- [12] M. Baumstein. Uso de varsol no processo de estabilização de filme holográfico para gravação. em comunicação a Lunazzi, circa 1986.
- [13] J. J. Lunazzi; P. M. Boone. One-step technique for enlarging straddling holographic images by white-light projection onto a diffractive screen. *Opt. Lett.*, 19(22), 1994.
- [14] J. J. Lunazzi. Enlarging holograms under white light, a way to save holographic material. *Holography, the newsletter of the International Technical Working GroupSPIE*, 9(2), 1998.
- [15] V. I. Bobrinev; J. Son. Method of producing a holographic projection screen for displaying a three-dimensional color images, 6211977 USA, US Patent, 2001.
- [16] d’Ursel. Stereoscopic image production method and device for implementing same, 6483534 USA-Europe extensions, 2002.
- [17] B. Block; A. Thorton. Optical head with a diffractive lens for focusing a laser beam, 6167016 USA, US Patent, 2000.

- [18] M. G. Morris; D. A. Buralli; R. J. Federico. Diffractive lens for vision correction, WO/2006/023404 USA, US Patent, 2006.
- [19] Guoqiang Li. Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications. In *Proc. PNAS*, volume 103(16), pages 6100–6104, 2006.
- [20] Kazuhiro Yamada; Wataru Watanabe; Yudong Li; Kazuyoshi Itoh; and Junji Nishii. Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses. *Opt. Lett.*, 29:1846–1848, 2004.
- [21] J. R. Marciante; D. H. Raguin. High-efficiency, high-dispersion diffraction gratings based on total internal reflection. *Optics Letters*, 29(6):542–544, 2004.
- [22] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, Inc., 2nd edition, 1996.
- [23] D. Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161:777, 1948.
- [24] A. Sommerfeld. *Optics, Lectures on Theoretical Physics*, volume IV. Academic Press Inc., New York, 1954.
- [25] N. I. R. Rivera. *Imagens por dupla difração com luz branca sem elementos intermediários*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [26] E. Hecht. *Óptica*. Calouste Gulbenkian, 2002.
- [27] M. C. Hutley. *Diffraction Gratings*, pages 23–26. Academic Press, London, 1st edition, 1982.
- [28] Wikipedia The free encyclopedia. Zone plate. *Wikimedia Foundation, Inc.*, 2008.
Disponível em:
http://en.wikipedia.org/wiki/Zone_plate
Acesso em 01 de Abril, 2008.

- [29] R. J. Collier; C. B. Burckhardt; L. H. Lin. *Optical Holography*, chapter 2.4.2. Academic Press, New York, 1st edition, 1971.
- [30] R. J. Collier; C. B. Burckhardt; L. H. Lin. *Optical Holography*, chapter 2.4.1. Academic Press, New York, 1st edition, 1971.
- [31] J. J. Lunazzi. A luz congelada. *Revista Ciência Hoje*, 3(16):36–46, 1985.
- [32] J. J. Lunazzi. Apostila de exposição de holografia. SBPC, 1982.
- [33] J. J. Lunazzi. Apostila do evento exposição de holografia, 2009. Disponível em: http://www.geocities.com/prof_lunazzi/ensino_de_holografia/introducao_a_holografia.htm.
- [34] J. J. Lunazzi. White light colour photography for rendering holoimages in a diffractive screen. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Holographic Systems, Components and Applications*, Neuchatel, Switzerland, 1993.
- [35] S. Eisebitt. Lensless imaging of magnetic nanostructures by x-ray spectroholography. *Nature*, 432:885–888, 2004.
- [36] Licht blicke. Catálogo de um grande evento de exposição de hologramas em Frankfurt AM Main, Alemanha, 1984. Prof. Lunazzi foi convidado a participar deste catálogo, sendo assim, recebeu de presente um exemplar do holograma fabricado pela firma Light Impressions, correspondente ao de Dan Schweitzer antes citado e cuja observação levou a invenção da tela holográfica.
- [37] J. J. Lunazzi; N. I. R. Rivera. Pseudoscopic imaging in a double diffraction process with a slit. *Optics Express*, 10(23):1368–1373, 2002.
- [38] J. J. Lunazzi; N. I. R. Rivera; D. S. F. Magalhães. Imaging with two spiral diffracting elements intermediated by a pinhole. *J. Opt. Soc. Am. A*, 25:1091–1097, 2008.

- [39] D. S. F. Magalhães. Estudo de imagens por dupla difração com seleção de luz branca e elementos definidos bidimensionalmente. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.
- [40] Wikipedia. Tela de neblina (fogscreen), 2009. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fogscreen>.
- [41] Io2 heliodisplay (50 model), 2009. Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=6DHAw0Rm8X8>.
- [42] Vlox locadora. Telas para aluguel, 2008.
- [43] Holopro, 2009. Disponível em [http://www.brookviewtechnologies.com/PDF/!HP -general info-.pdf](http://www.brookviewtechnologies.com/PDF/!HP-general%20info-.pdf).
- [44] Sharp's 3d lcd, 2004. Disponível em [http://www.theregister.co.uk/2004/08/12/3d illusion/](http://www.theregister.co.uk/2004/08/12/3d_illusion/).
- [45] M. Semin; M. Krutik; H. W. Jeon J. Y. Son; V. G. Komar; Y. S. Chun; S. Sabo; V. Mayorov; L. Balasny; S. Belyaev. A multiview 3-d imaging system with full color capabilities. In *Proc. of SPIE*, volume 3295, San Jose, California, USA, 1998.
- [46] Holografika, 2009. Disponível em <http://www.holografika.com/>.
- [47] T. Balogh. The holovizio system. In *Proc. of SPIE*, volume 6055, 2006. Available at <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006SPIE.6055..279B>.
- [48] H. Fuchs; S. M. Pizer. Three dimensional display using a varifocal mirror, United States Patent 4607255, 1986.

- [49] J. C. Ramos; S. V. Montiel; J. H. de la Cruz; O. G. Lievanos; W. C. Arriaga. Optica difractiva: una revisión al diseño y construcción de sistemas ópticos empleando lentes difractivas. *Rev. Mex. De Física*, 52(6):479–500, 2006.
- [50] J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães; N. I. R. Rivera; R. L. Serra. Holo-television system with a single plane. *Opt. Lett.*, 34:533–535, 2009.
- [51] Wikipedia The free encyclopedia. Curva de nível. *Wikimedia Foundation, Inc.*, 2009.
- [52] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*, chapter 9.5.1, pages 314–317. McGraw-Hill, Inc., 1996.
- [53] D. S. F. Magalhães; J. J. Lunazzi; R. L. Serra; M. C. I. Amon. Construcción de lentes difractivas y sus aplicaciones como pantallas holográficas. In *Proc. of the Congreso Internacional FISAPLIC 2008*, 2008.
- [54] J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães. Mechanical stabilization of a gas laser interferometric system for making diffractive lenses. In *Proc. XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, São Lourenço, MG, Brasil, May 2007.
- [55] R. J. Collier; C. B. Burckhardt; L. H. Lin. *Optical Holography*, chapter 1.3.1. Academic Press, New York, 1st edition, 1971.
- [56] Wikipedia The free encyclopedia. Fresnel lens. *Wikimedia Foundation, Inc.*, 2009.
Disponível em:
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel lens](http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_lens)
Acesso em 20 de Março, 2009.
- [57] G. R. Fowles. *Introduction to modern optics*, chapter 5.5, page 126. Dover publications, Inc., New York, 2nd edition, 1989.

- [58] J. J. Lunazzi; N. I. R. Rivera. 3d shadowgram projection using a simple diffractive screen. In *Proc. of the XXIX Enc. Nac. de Fis. da Mat. Cond.*, São Lourenço, MG, 2006.
- [59] J. J. Lunazzi; N. I. R. Rivera. 3d imaging with a linear light source. In *Proc. AIP Conf.*, volume 992, pages 677–680, Campinas, SP, Brazil, 2008.
- [60] J. J. Lunazzi; N. I. R. Rivera. White-light imaging in a two gratings diffraction process. *Journal of Optics of the Optical society of India*, 37(2):56–62, 2008.
- [61] R. J. Collier; C. B. Burckhardt; L. H. Lin. *Optical Holography*, chapter 8. Academic Press, New York, 1st edition, 1971.
- [62] I. Bányász. Refractive index modulation vs. before-bleach optical density modulation characteristics of silver halide phase holograms. *Optics Communications*, 24:79–91, 2005.
- [63] J. J. Lunazzi; P. M. Boone. Recording of large horizontal dispersive holographic screens with pulsed lasers. Artigo a ser elaborado com notas experimentais de J. J. Lunazzi das telas gravadas na Bélgica em 1994.
- [64] H. M. Smith, editor. *Holographic Recording Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977.
- [65] PFG-01. High resolution photographic films (red sensitive 633 nm), 2009. SLAVICH Join Stock Company, Russia.
- [66] Integraf L.L.C. Holographic film and plates. Online catalog available at: [http://www.holokits.com/hologram film plates.htm](http://www.holokits.com/hologram%20film%20plates.htm), Abril 2009.
- [67] J. W. Mitchell. Photographic sensitivity. *Repts. Progr. Phys.*, 20:433–515, 1957.
- [68] J. W. Mitchell. The concentration theory of latent image formation. *Photogr. Sci. Eng.*, 22:249–255, 1978.

- [69] J. W. Mitchell. The formation of the latent image in photographic emulsion grains. *Photogr. Sci. Eng.*, 25:170–188, 1981.
- [70] J. W. Mitchell. Evolution of the concepts of photographic sensitivity. *J. Imag. Sci. Tech.*, 43:38–48, 1999.
- [71] H. I. Bjelkhagen. *Silver-Halide Recording Materials*. Springer, 1995.
- [72] R. L. Serra et al. Procedimiento para el procesamiento de hologramas de reflexión con emulsión AGFA GEVAERT 8E75HD, Patent n. CU 22617 A1, Cuba, 1997.
- [73] H. I. Bjelkhagen. *Silver-halide recording materials*, chapter 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2nd edition, 1995.
- [74] P.M. Boone. Some problems associated with processing AGFA GEVAERT 8E75HD sheet film for reflection holography. In *SPIE*, volume 600, page 172, 1985.
- [75] Hyundai. E465s 3d stereoscopic lcd tv.
- [76] H. O. Li; J. Seo; K. Kham; and S. Lee. Method of measuring subjective 3-d visual fatigue: a five-factor model. In *Proc. of the Optics and Photonics Congress Spring - OSA*, 2008. paper DWA5.
- [77] L. Onural. Holographic 3dtv research within the european 3dtv project. In *Proc. of the Optics and Photonics Congress Spring - OSA*, 2008. paper DWA1.
- [78] Seung-Hyun Lee; Ji-Sang Yoo; and Dong-Wook Kim. Current research and development activities for 3d applications in korea. In *Proc. of the Optics and Photonics Congress Spring - OSA*, 2008. paper DWA6.
- [79] M. Lucente; P. St. Hilaire; S. A. Benton; D. L. Arias; and J. A. Watlington. New approaches to holographic video. In *Proc. SPIE*, volume 1732, 1992. paper 1732-48.

- [80] M. Lucente. Interactive three-dimensional holographic displays: seeing the future in depth. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 31, pages 63–67, 1997.
- [81] T. Honda; M. Shimomatsu; H. Imai; S. Kobayashi; H. Nate; and H. Iwane. Second version of 3d display system by fan-like array of projection optics. In *Proc. SPIE*, volume 5006, 2003.
- [82] K. Takano; and K. Sato. Color electroholography by virtual image reconstruction using single dmd panel. In *Proc. of Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, volume 89, pages 44–52, 2006.
- [83] S. Tay; P.-A. Blanche; R. Voorakaranam; A. V. Tunç; W. Lin; S. Rokutanda; T. Gu; D. Flores; P. Wang; G. Li; P. St Hilaire; J. Thomas; R. A. Norwood; M. Yamamoto; and N. Peyghambarian. An updatable holographic three-dimensional display. *Nature*, 451:694–698, 2008.
- [84] N. Peyghambarian; S. Tay; P.-A. Blanche; R. Norwood; and M. Yamamoto. Rewriteable holographic 3d displays. *OPN*, July/August 2008.
- [85] C. Newswanger. Real-time autostereoscopic displays using holographic diffusers, U.S. patent 4,799,739 (24 January, 1989).
- [86] J.J. Lunazzi; M. Diamand. Volume images vector display based on a diffractive screen. *Optical Review*, 6(6):513–517, 1999.
- [87] J. J. Lunazzi. The use of diffractive screens for electronic imaging. In *Proc. HODIC Circular*, volume 17, Feb 1997. Presented at the meeting of the Japan Association of Display Holography, Tokyo, Japan. Also available at: <http://arxiv.org/abs/physics/0609243v1>.

- [88] E. G. da Fonseca; P. L. de Gues; C. F. X. de Mendonça N; J. J. Lunazzi; E. Bertini. A holographic visualisation system: A sequel. In *Proceedings of the X International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision*, pages 135–141, 1998.
- [89] J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães. Holotv, 2008. Video associated to the article by Opt. Lett. Journal, available at:
<http://www.youtube.com/watch?v=tBuhE5s0WDQ>.
- [90] J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães. Holotv, 2008. A similar precedent video, available at:
<http://www.youtube.com/watch?v=Tw5nkWhP9RI>.
- [91] J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães. Color on white-light three-dimensional images projected on holographic screens by three-chromatic multiple projection: first results for an image point. In *Proc. of Optics and Photonics Congress Spring - OSA*, 2008. paper DTuA4.
- [92] K. E. Olsen. *Holographic multi-stereogram constructed from computer images : Applied 3-D printer*. PhD thesis, Department of Physics, Universitas Bergensis, 1996. Chap. 2.
- [93] G. Saxby. *Manual of practical holography*, pages 93–94. Focal Press (UK), 1991.
- [94] Wikipedia The free encyclopedia. Photonic-crystal fiber. *Wikimedia Foundation, Inc.*, 2009. Disponível em:
[http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic-crystal fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic-crystal_fiber)
Acesso em 21 de Agosto, 2009.
- [95] J. J. Lunazzi; R. L. Serra; D. S. F. Magalhães. Construcción de pantallas holográficas con dispersión vertical y su aplicación en estereoscopia. In *Proc. of the Congreso Internacional de Optica, Vida y Patrimonio*, La Havana, Cuba, 2009.

- [96] J. J. Lunazzi; R. L. Serra; D. S. F. Magalhães. Estereoscópio com tela holográfica para ver tomografias. In *Proc. of the Latin Display 2008*, Campinas, Brasil, 2008.
- [97] Wikipedia The free encyclopedia. Estereoscopia. *Wikimedia Foundation, Inc.*, 2009. Disponível em:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Estereoscopia>
Acesso em 30 de Abril, 2009.
- [98] Filme u2 3d. Directed by C. Owens and M. Pellington, 2008. baseado em projeção digital e óculos polarizados.
- [99] J.J. Lunazzi; P.M. Boone. 3d image projection using large diffractive screens. In *Proc. of the International Symposium on Display Holography*, volume 2333, pages 449–453, Lake Forest, USA, 1994. SPIE.
- [100] J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães. Descrição dos sistemas mais atuais de demonstração de imagens tridimensionais a olho nu, do papel das telas holográficas neles, e de sistemas pseudo-3d. In *Proc. do Encontro latinoamericano LatinDisplay 2007*, Campinas, SP, 2007.

.

Parte VII

Apêndices

.

Apêndice A

Revelador para utilização com PFG-01

Para utilização do filme holográfico PFG-01 [A.1], foi desenvolvido pelo autor da tese um revelador baseado no já existente *Revelador CWC1* [A.2]. A vantagem deste revelador é que utiliza uma quantidade reduzida de produtos químicos que implica em redução de custos.

Tabela A.1: Revelador para filme holográfico PFG-01

Solução A	Solução B
Catechol (ou Pyrocatechol) - 5g	Sodium Carbonate (anhydrous) - 15g
Sodium Sulfite (anhydrous) - 5g	Água destilada - 0,5 litro
Água destilada - 0,5 litro	

Depois de revelado, o filme pode ser branqueado utilizando, por exemplo, o processo de duplo branqueamento [A.3]. O uso do processo de duplo branqueamento também é uma novidade no uso dos filmes PFG e apresentou resultados muito bons.

Referências Bibliográficas

- [A.1] PFG-01 High Resolution Photographic Films (red sensitive 633 nm), SLAVICH Join Stock Company, Russia.
- [A.2] H. I. Bjelkhagen, “Silver halide Recording Materials” 2nd ed. pp.141
- [A.3] Serra et al, ”Procedimiento para el procesamiento de hologramas de reflexión con emulsión AGFA GEVAERT 8E75HD”, Patent n. CU 22617 A1, Cuba

Apêndice B

Gravação de telas holográficas simples com laser de diodo

Neste Apêndice B, descrevemos um sistema didático para obtenção de telas holográficas simples utilizando laser de diodo e elementos ópticos de fácil aquisição. Este trabalho foi realizado em conjunto com a aluna M. C. I. Amon durante sua iniciação científica.

B.1 Introdução

A difração é um fenômeno que está associado a desvios da propagação de ondas. Os efeitos da difração são notáveis quando as ondas passam por um orifício ou contornam um objeto cuja dimensão é da ordem de grandeza do seu comprimento de onda. No nosso caso iremos estudar a difração da luz (ondas eletromagnéticas).

A primeira publicação sobre o desvio da luz a partir de uma propagação linear foi de Francesco Grimaldi em 1665.

A partir da teoria ondulatória da luz, proposta por Huygens (1678) é que surgiram explicações mais precisas para este fenômeno. Huygens imaginou cada ponto da frente de onda como centro de uma perturbação, emitindo ondas secundárias. Ele deu uma explicação qualitativa para o fenômeno, porém acreditava que não passava de um

problema de múltipla interferência.

Somente no final do século XIX é que foi proposto o primeiro modelo matemático para a difração, conhecido como teoria da difração de Fresnel-Kirchoff. Os resultados descrevem a onda após o anteparo como uma superposição de todas as ondas esféricas pontuais presentes na região da abertura.

Fresnel calculou a distribuição da luz em espectros de difração. Ele ganhou o prêmio da Academia Francesa de Ciências, porém o matemático Poisson, que fazia parte da banca examinadora, discordou da teoria de Fresnel que previa um ponto luminoso no centro da sombra de um objeto circular. Mas Arago, outro membro do comitê, realizou o experimento e confirmou as previsões de Fresnel.

Dennis Gabor, em 1948, propôs uma nova técnica chamada por ele de reconstrução da frente de onda, conhecida hoje como holografia. Quando a luz monocromática está presente ao mesmo tempo com luz difratada ou espalhada por um objeto, então a informação tanto da amplitude quanto da fase da onda difratada (espalhada) podem ser gravadas, independente do fato de o material de gravação responder apenas à intensidade da luz. Ele ganhou o Prêmio Nobel em 1971.

Independentemente, em 1958, Yuri N. Denisyuk também desenvolve a holografia, porém a reconstrução do objeto é feita com luz branca e não monocromática.

A pesquisa em óptica difrativa usa técnicas que modificam um feixe de luz para criar uma nova fonte luminosa. Dessa forma é possível desenvolver tecnologias para fabricar novos microcircuitos optoeletrônicos, como fotodetectores de câmaras fotográficas digitais, fabricação de lentes intra-oculares, além de confeccionar hologramas impressos em cartões de crédito, telas holográficas ou ainda criar imagens artísticas e publicitárias.

As lentes difrativas são usadas focalizar a luz monocromática. Elas são gravadas utilizando o princípio da holografia. Uma lente difrativa consiste em uma série de anéis ou de “zonas radiais” de larguras decrescentes. Elas também têm uma aplicação recente na astronomia. São utilizadas na fabricação de telescópios espaciais, pois são

relativamente insensíveis a imperfeições em superfícies reduzindo distorções e evitando aberrações de imagens.

As lentes difrativas também podem ser produzidas visando sua aplicação como telas holográficas de luz branca (Parte III). Para construir uma tela holográfica simples são necessários elementos ópticos caros como filtros espaciais, espelhos de primeira superfície, lasers de He-Ne, mesas estabilizadas, etc; o que pode impossibilitar sua construção. Pensando em simplificar os métodos empregados e até a construção e aplicação a alunos de ensino superior ou médio, desenvolvemos este trabalho.

B.2 Descrição

Para construir uma tela holográfica simples com laser de diodo utilizamos o esquema mostrado na Figura B.1. Parte do feixe divergente gerado por um laser de diodo atravessa um filtro de densidade neutra e depois é refletido por um espelho plano (Espelho 1) até chegar ao filme holográfico (Suporte e filme). Outra parte viaja até atingir outro espelho plano (Espelho 2) onde é refletido para atingir o filme ortogonalmente. Para conseguir um equilíbrio de intensidades entre as duas partes do feixe pode ser utilizado uma folha de papel branco na posição do filme e visualmente observando as intensidades enquanto se movimenta o laser. O filtro neutro é utilizado para um ajuste fino das intensidades.

Para a gravação da tela é necessário um laser que produza um feixe divergente. Muitos diodos lasers de caneta podem ter sua lente colimadora retirada facilmente para a obtenção de um feixe divergente. O comprimento de coerência do laser é uma característica que varia entre marcas, modelos e até mesmo entre elementos de mesmo modelo, assim devem ser testados e para amenizar tal problema, deve-se minimizar a diferença de caminho óptico. Para as gravações utilizamos um laser de diodo da Integraf modelo DL-4B de 4 mW de emissão no vermelho (650 nm) [B.1]. Estas distâncias definem



Figura B.1: Sistema holográfico utilizado para gravar uma tela holográfica simples com laser de diodo.

a distância focal da tela pela equação 2.16. Na Figura B.1 temos uma diferença de caminho consideravelmente grande, mas possibilitou a obtenção de telas com eficiência passível de utilização em aplicações com luz branca. A Figura B.2 mostra o sistema representado esquematicamente pela Figura B.1.



Figura B.2: Foto do sistema holográfico utilizado para gravar uma tela holográfica simples com laser de diodo.

O filme empregado foi o mesmo Agfa 8E75HD. O processo de revelação e branqueamento do filme utilizado foi o apresentado em [B.2], mas também poderia ser empregado o processo detalhado no Capítulo 6, ou no caso de utilização com o filme PFG-01 [B.3] o revelador apresentado no Apêndice A.

B.3 Resultados e análise

Com este sistema obtivemos lentes de até 3,5% de eficiência de difração no tamanho de 100 cm^2 . O ângulo de gravação utilizado foi de 30° , o que nos permite utilizar a equação 2.16 para calcular a distância focal. O valor medido foi de 80 cm, que está de acordo com o previsto utilizando as distâncias da Figura B.1. A baixa eficiência de difração é resultado das instabilidades no chão e também da diferença de caminho ótico dos feixes objeto e referência ser muito grande.

Utilizamos a tela obtida acima para fazer imagens com uma fonte linear do tipo apresentado no Capítulo 10. A Figura B.3 mostra o objeto e a imagem produzida com a tela obtida. A imagem tridimensional obtida apresenta paralaxe horizontal contínua.



Figura B.3: À esquerda, o objeto utilizado para a visualização da imagem e à esquerda a imagem visualizada com a tela holográfica.

B.4 Conclusão

Utilizando um sistema simples e barato foi possível obter telas holográficas simples com laser de diodo com eficiência de difração de até 3,5% e tamanho de 100cm^2 . As telas foram utilizadas para fazer imagens utilizando o método de holoprojeção de objetos usando um elemento difrativo e uma fonte linear com boa eficiência luminosa.

Referências Bibliográficas

[B.1] Holography Diode Laser, disponível em:

[http://www.holokits.com/hologram diode laser.htm](http://www.holokits.com/hologram%20diode%20laser.htm)

[B.2] P.M. Boone, "Some problems associated with processing Agfa-Gevaert 8E75HD sheet film for reflection holography", SPIE 600, 172, (1985).

[B.3] PFG-01 High Resolution Photographic Films (red sensitive 633 nm), SLAVICH Join Stock Company, Russia.

.

Apêndice C

Sistema de estabilização mecânica de um sistema para gravação de telas holográficas simples com laser de gás

Neste Apêndice C descreveremos um sistema de estabilização mecânica desenvolvido durante a tese que possibilita a melhora da eficiência de difração em telas holográficas simples, ou talvez em outros casos onde não é possível utilizar mesas estabilizadas. Com as gravações holográficas realizadas sobre o chão foi possível melhorar consideravelmente os resultados das telas gravadas. O trabalho foi publicado como Resumo Estendido no congresso *XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada - 2007*, tendo como autores J. J. Lunazzi e D. S. F. Magalhães.

C.1 Introdução

Pode acontecer que quando montamos um sistema interferométrico grande, como um sistema holográfico, a eficiência de difração obtida resulta menor que a esperada. Se

nossos filmes holográficos forem verificados com sistemas mais estáveis e o laser empregado tem comprimento de banda suficientemente curto para garantir a coerência na diferença de caminho, então podemos atribuir o problema às instabilidades. Muitos trabalhos foram publicados para reduzir a instabilidade por meio de elementos eletrônicos [C.1, C.2, C.3]. Vibrações mecânicas podem estar sendo geradas em regiões externas ao laboratório o que pode ser difícil controlar mas com um método simples que consiste em fazer conexões rígidas utilizando barras de metal nas partes superiores dos elementos ópticos. Pode parecer muito complicado mas resulta mais efetivo e certamente mais barato que o emprego de mesas especiais pressurizadas ou com controle pneumático. Descreveremos nossos resultados na obtenção de telas holográficas simples em sistemas maiores que 3 m x 3 m.

C.2 Descrição

Montamos nosso sistema óptico sobre o chão, sem qualquer mesa de estabilização pneumática em uma área de $5,4 \pm 0,1m^2$, planejando obter telas holográficas simples de 20 x 30 cm. A Figura C.1 mostra o aparato. L é o laser de He-Ne de 10 mW, PM é um espelho plano de primeira superfície, BS é o divisor de feixes, SF são filtros espaciais e F é o filme holográfico. A distância entre SF1 e o filme F é $z_o = 1,00 \pm 0,01m$ e a distância entre SF2 e F é $z_r = 2,16 \pm 0,01m$. O valor da distância focal resultante foi de $1,862 \pm 0,005m$.

Com esta montagem, sem qualquer método de estabilização, obtivemos baixas eficiências de difração de aproximadamente $0,08 \pm 0,01\%$. Apesar de que nosso filme holográfico (AGFA 8E75HD) haver sido produzido em 1992 nós esperávamos eficiências consideravelmente maiores.

Montamos dois tipos diferentes de sistemas interferométricos para estudar as causas destas baixas eficiências. Com um interferômetro de Mach-Zehnder [C.4] obtido colo-

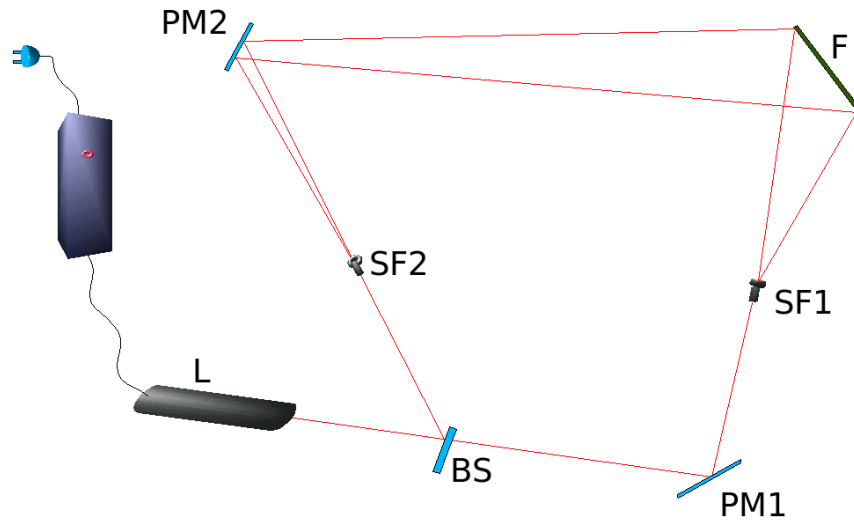


Figura C.1: Sistema holográfico utilizado para gravar uma tela holográfica simples.

cando um divisor de feixes na posição do filme biseccionando os ângulos de incidência para recombinar o feixe; e com um interferômetro de Michelson [C.5], analisamos a instabilidade das franjas e concluímos que as instabilidades eram devido a vibrações mecânicas no chão e, em menor escala, a convecção do ar dentro do laboratório. Construímos um sistema para análise das vibrações que utilizava um photodetector acoplado a placa de som de um computador e dessa forma fizemos a análise gráfica das vibrações por um programa que simula um osciloscópio. A Figura C.2 mostra as franjas que foram estudadas com o interferômetro de Mach-Zehnder.

Para melhorar as eficiências pela diminuição da instabilidade, usamos barras de alumínio em forma de "U" de espessura de 2 mm coladas no topo de cada elemento óptico com cola instantânea de metacrilato. A Figura C.3 mostra as barras coladas em elementos ópticos.

Para evitar as correntes de convecção do ar dentro do laboratório, cobrimos o sistema com uma camada de filme plástico. A Figura C.4 mostra as barras coladas sobre um

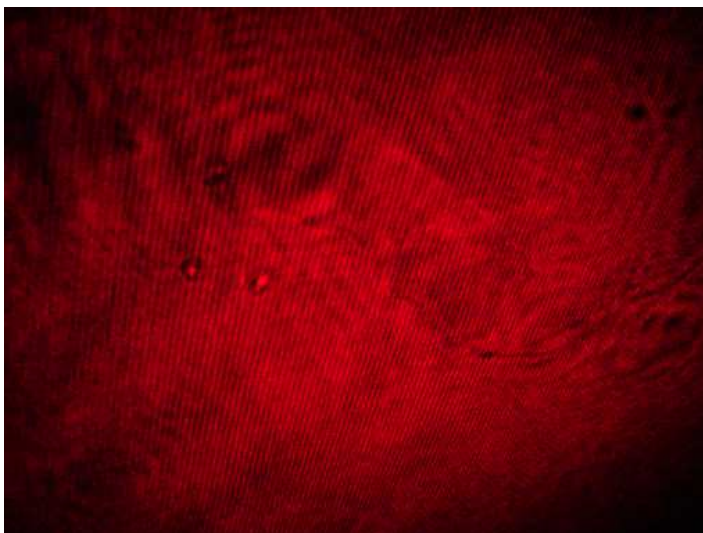


Figura C.2: Franjas de interferência analisadas com um detector de onde se concluiu que as instabilidades aconteciam devido a vibrações no chão do laboratório.

dos espelhos planos; atrás o filme plástico.



Figura C.3: O divisor de feixes e um dos filtros espaciais estão fixos a outros elementos ópticos por meio de barras coladas com matacrilato.



Figura C.4: As barras coladas sobre um dos espelhos planos; atrás o filme plástico.

C.3 Resultados e discussão

Utilizando o sistema descrito acima obtivemos telas holográficas simples com eficiência de difração de até $9,3 \pm 0,1\%$, aumentando para mais de 100x as eficiências prévias. Devido a instabilidades desconhecidas restantes obtivemos um valor médio de $3,8 \pm 0,9\%$. Para melhorar ainda mais o valor médio passamos a adicionar 2 ou três camadas de *plástico-bolha* entre o chão e os elementos ópticos. Esta camada ajudou a melhorar

mas não mais de 1% o valor médio.

C.4 Conclusão

O sistema de estabilização utilizando barras de alumínio conectando cada elemento óptico tornou possível a melhora de mais de 100x na eficiência de difração das telas holográficas simples gravadas.

Referências Bibliográficas

- [C.1] Guest, C. C.; Gaylord, T. K.; “Phase stabilization system for holographic optical data processing”, Applied Optics (ISSN 0003-6935), vol. 24, July 15, 1985, p. 2140-2144.(07/1985)
- [C.2] Frejlich, Jaime; Cescato, Lucila H. D.; Mendes, Geraldo F.; “Analysis of an active stabilization system for a holographic setup”, Applied Optics, Volume 27, Issue 10, May 15, 1988, pp.1967-1976 (05/1988)
- [C.3] Little, Gordon R.; “Phase stabilization and control technique with improved precision”, Applied Optics, Volume 25, Issue 12, June 15, 1986, pp.1871-1872 (06/1986)
- [C.4] Wikipedia, “Mach-Zehnder interferometer”, available at:
http://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder_interferometer
- [C.5] Wikipedia, “Michelson interferometer”, available at:
http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson_interferometer

.

Apêndice D

Tela Holográfica Simples obtida por partes

A técnica apresentada neste capítulo permite a obtenção de telas holográficas simples através de múltiplas exposições em diferentes regiões do mesmo filme holográfico. A vantagem deste sistema é que ele permite a obtenção de telas holográficas simples de grande tamanho, pois as exposições acontecem sucessivamente em pequenas regiões.

D.1 Descrição

A construção de elementos ópticos por partes já foi feita em lentes telescópicas (Figura D.1). Abaixo apresentamos um método de obtenção de telas holográficas simples por partes.

Através da varredura do filme holográfico, pela movimentação dos espelhos convexos da Figura D.2, em sucessivas gravações é possível construir uma tela holográfica simples sem a necessidade de laser pulsado ou de uma mesa estabilizada de grande tamanho.

Os espelhos convexos empregados foram obtidos pela deposição de uma camada de alumínio sobre um “vidro de relógio”. A região iluminada em cada uma das exposições cobria uma área de 2,5 cm x 2,5 cm. O laser empregado foi um He-Ne de 10 mW.

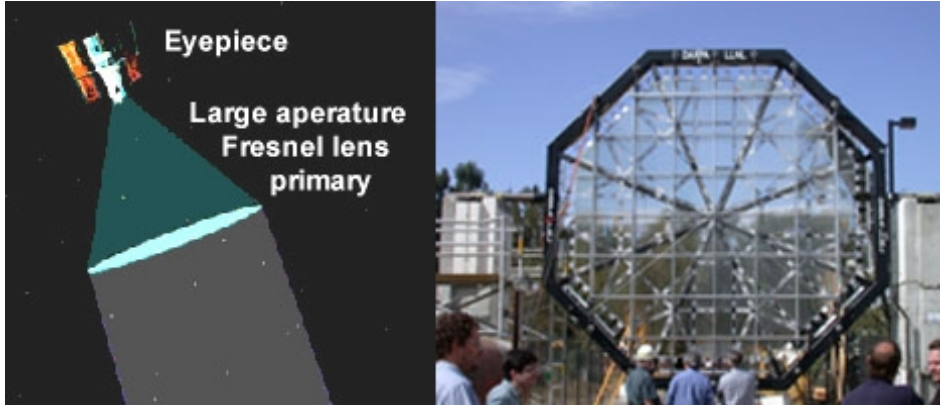


Figura D.1: Lente de Fresnel construída por partes.

O ponto de contato do laser colimado com cada espelho convexo define as origens (x_o, y_o, z_o) e (x_r, y_r, z_r) , como mostrado na Figura 4.2.

D.2 Resultados

Para que pudéssemos compor um sistema capaz de fazer múltiplas gravações em diferentes regiões de um filme holográfico, foi necessário deslocar os dois feixes no plano xy (do filme) de maneira controlada. Conseguimos isso com controladores de inclinações no espelho plano mostrado na Figura D.2; e inserindo outros dois espelhos planos (EC) entre o divisor de feixe e o espelho convexo 1. Foi utilizada uma máscara de cartolina negra para limitar a região iluminada.

Exposição dupla

Com o sistema alinhado, e com tempos de exposição da ordem de 0,02s realizamos as gravações obtendo um eficiência de difração média de $(1,2 \pm 0,6)\%$.

Exposição quádrupla

Mantivemos os mesmos tempos de exposição anteriores, obtivemos pequenas telas de $25cm^2$ e eficiência de difração médio de $(0,155 \pm 0,008)\%$.

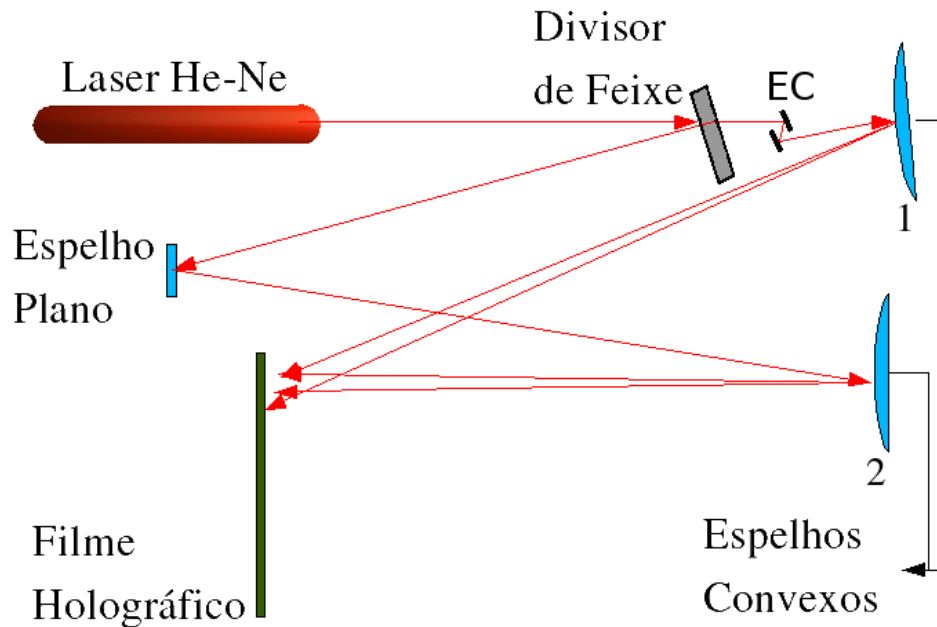


Figura D.2: Esquema simplificado da gravação de uma tela holográfica por partes. EC são dois espelhos planos com controle angular.

D.2.1 Análise

Com o aumento do número de exposições ocorreu uma diminuição da eficiência de difração resultante, provavelmente, de uma sobreposição ainda presente pelas bordas da máscara. A região de união entre cada porção gravada define uma borda que resulta inconveniente na visualização de uma imagem projetada. Nenhum efeito de redução de resolução resultado da limitação de cada parte do elemento foi perceptível.

Para a otimização do sistema é necessário criar um controle de movimento dos espelhos por meio de motores de passo. Para melhorar as eficiências de difração é necessário isolar melhor as regiões expostas entre cada exposição.

D.3 Conclusão

O sistema de gravação por partes permite a gravação de telas holográficas simples. É um sistema que pode ser empregado quando o objetivo for a obtenção de telas maiores

de $1m^2$, entretanto é importante a utilização de um sistema que controle o movimento dos espelhos convexos e delimitar cada região iluminada com precisão maior que 0,5 mm.

Apêndice E

Programa de traçado de raios para cálculo da distância focal de telas holográficas com extensão de campo vertical

O programa abaixo calcula a distância focal de telas holográficas com extensão de campo vertical a partir da equação 2.1. Para isso determinamos as frequências espaciais em dois pontos quaisquer da tela e a partir da equação 1.1 analisamos para onde convergem os raios que passam por esses dois pontos. O programa está escrito para o programa *Mathematica* e os valores estão todos em metros. O comprimento de onda considerado na gravação e reconstrução foi $632 \cdot 10^{-9} \text{m}$. Esta análise é livre de qualquer aproximação.

Clear [v,u,xQ,x,y,yQ,zQ]

$$\Delta l = \sqrt{v^2 + u^2 - 2uv\cos\theta} + \sqrt{(xQ - x)^2 + (yQ - y)^2 + zQ^2} - \sqrt{v^2 + x^2 + y^2};$$

(*Cálculo de Δl para $x=0.03m$ *)

y=0;

x=0.03;

u=2.37;

v=0.7;

$\theta = \text{Pi}/4$;

xQ=2.37*Sin[θ];

yQ=0;

zQ=2.37*Cos[θ];

(*Cálculo do número de franja*)

$$n = \frac{\Delta l}{632 \cdot 10^{-9}}$$

$$5.67642 \times 10^6$$

Clear [x]

(*Cálculo do máximo*)

Solve[$\Delta l = 5.676420 \cdot 10^6 \cdot 632 \cdot 10^{-9}$,x]

(*Cálculo do máximo seguinte*)

Solve[$\Delta l = 5.676421 \cdot 10^6 \cdot 632 \cdot 10^{-9}$,x]

x→0.0300001

x→0.0299993

(*Cálculo da frequência espacial em $x=0.03$ *)

Clear[f1]

$$f1 = \frac{1}{0.0300001 - 0.0299993}$$

$$1.17644 \cdot 10^6$$

(*Cálculo de Δl para $x=-0.03m$ *)

y=0;

x=-0.03;

u=2.37;

v=0.7;

$\theta = \text{Pi}/4$;

xQ=2.37*Sin[θ];

yQ=0;

zQ=2.37*Cos[θ];

(*Cálculo do número de franja*)

$$n = \frac{\Delta l}{632 \cdot 10^{-9}}$$

5743548

Clear [x]

(*Cálculo do máximo*)

Solve[$\Delta l = 5743548 * 632 * 10^{-9}$,x]

(*Cálculo do máximo seguinte*)

Solve[$\Delta l = 5743549 * 632 * 10^{-9}$,x]

x→-0.0300001

x→-0.0300011

(*Cálculo da frequência espacial em x=-0.03*)

Clear[f2]

$$f2 = \frac{1}{0.0300011 - 0.0300001}$$

1.06097*10⁶

(*Considerando incidência a 45 graus na reconstrução*)

Clear[θ_1, θ_2]

$\theta_1 = \text{ArcSin}[f1 * 632 * 10^{-9} - \text{Sin}[\text{Pi}/4]]$

$\theta_2 = \text{ArcSin}[-f2 * 632 * 10^{-9} + \text{Sin}[\text{Pi}/4]]$

0.0364107

0.0365818

(*Descobrimos a coordenada x do encontro das duas retas-raios, durante a reconstrução*)

Clear[x]

Solve[Tan[Pi/2 + Abs[θ1]]*(x-0.03)==

Tan[Pi/2 - Abs[θ2]]*(x+0.03),x]

x→0.0000704092

(*Qual z corresponde esse x?*)

Clear[z,x]

z=Tan[Pi/2 - Abs[θ2]]*(0.0000704092+0.03)

0.821637

Apêndice F

Outras aplicações das telas holográficas horizontalmente dispersivas

Neste apêndice descrevemos brevemente o funcionamento do holoprojetor [F.1] por lançamento horizontal de vistas, a HoloTV de plano único paralela e o ampliador de hologramas, outras aplicações da tela holográfica horizontalmente dispersiva que poderão ser melhoradas com a utilização das telas desenvolvidas nesta tese.

F.1 Holoprojetor por lançamento horizontal de vistas

Projetar sobre uma lente onde esta funciona como tela é uma técnica ocasionalmente usado em cinematografia [F.2]. Projetar sobre uma lente de fresnel faria dela uma tela com 100% de eficiência e reprodução de cor. Isto é utilizado em alguns sistemas de mostradores atrativos para publicidade, mas entendemos que tem limitações de campo e pouco ou nenhum aumento na imagem a respeito do objeto. No caso da projeção com

ampliação J. J. Lunazzi tem encontrado que uma lente de Fresnel de 40 cm de diâmetro, do tipo usado em retroprojetores não teria campo suficiente como para permitir a visão binocular. Uma tela holográfica horizontalmente dispersiva expande o campo na medida de sua dispersão e, embora reduza a profundidade de foco da imagem e a qualidade da cor, permite que um objeto seja visto ampliado com paralaxe horizontal contínuo e com mais brilho que nos casos de dupla difração.

O holoprojetor é um aparelho que utiliza as propriedades da tela holográfica horizontalmente dispersiva para a reprodução de imagens tridimensionais completas ou holoimagens. A Figura F.1 mostra o sistema. O holoprojetor é semelhante a um projetor de diapositivos (slides) mas, devido à nova técnica desenvolvida, ele funciona na realidade como um projetor perfeitamente tridimensional projetando não fotografias senão objetos.



Figura F.1: Holoprojetor por lente horizontal

A Figura F.2 mostra uma visão de cima da holoprojeção de um objeto, uma casa. Cada um dos pontos objeto representados correspondem às extremidades laterais de observação. A lente projetora focaliza a imagem sobre a tela holográfica e cada um dos pontos é direcionado para um dos olhos do observador. Considerando um objeto iluminado com luz branca, temos um caso parecido com o da lente difrativa na Figura 1.5 e cada olho do observador receberá a imagem em uma cor do espectro.

A Figura F.3 mostra uma imagem visualizada com o sistema.

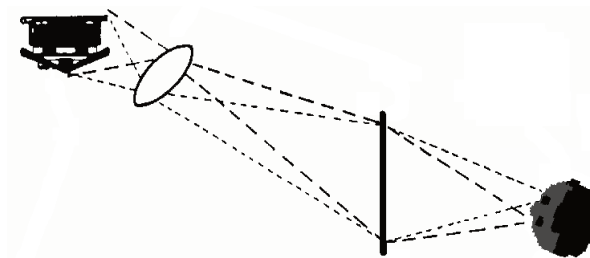


Figura F.2: Formação da imagem com o holoprojetor.



Figura F.3: Imagem visualizada com o holoprojetor por lente horizontal.

Holoprojetor foi apresentado em São Paulo, exemplares vendidos em Madrid, Curitiba e Museu de Ciência e Técnicas de BH.

O aporte desta tese a melhora deste sistema é o aumento da eficiência de difração, de 2,8% para 20%, que resulta em imagens mais brilhantes para o observador.

F.2 HoloTV de plano único paralelo

Trata-se de um sistema que permite desde 1993 exibir ao público em geral uma imagem plana flutuando paralelamente ao plano da tela. Oferece imagens de grande tamanho (máximo de 0,75 m x 1,14m) que podem ser vistas por até 5 pessoas simultaneamente num ambiente em penumbra. Uma sala com dimensões mínimas de 6 m de largura por

12 m de profundidade é ideal. O público verá, a uma certa distância, uma imagem que sai de uma tela que aparece invisível, até 1 m a frente dela.

O sistema para realização destas imagens é idêntico ao da Figura 2.1 mas substituindo a segunda rede (DG2) por uma tela holográfica horizontalmente dispersiva. As imagens podem ser vistas na Figura F.4 e o campo de observação das imagens é mostrado e representado na Figura F.5.



Figura F.4: HoloTV de plano único paralelo a tela.

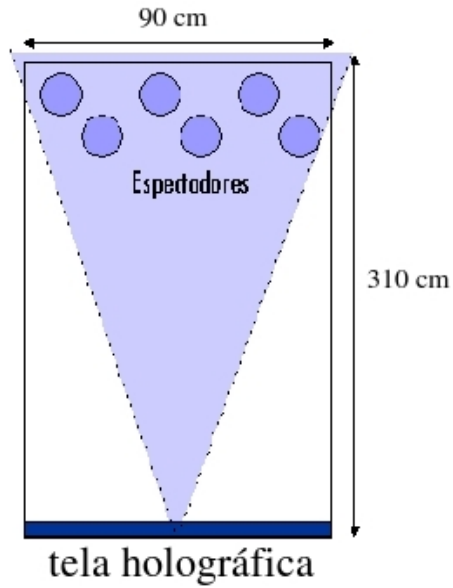


Figura F.5: Campo de observação das imagens.

F.3 Sistema vetorial de criação de holoimagens

O desenvolvimento da imagem eletrônica holográfica com paralaxe contínuo atingiu grau satisfatório em dezembro de 1994 quando foi mostrada a possibilidade de fazer uma imagem vetorial (representação ponto a ponto) completa. Este sistema (Figura F.6(a)) está sendo remontado por um aluno de iniciação científica e teve colaboração no autor desta tese. Um exemplo de figura gerada é mostrado na Figura F.6(b).

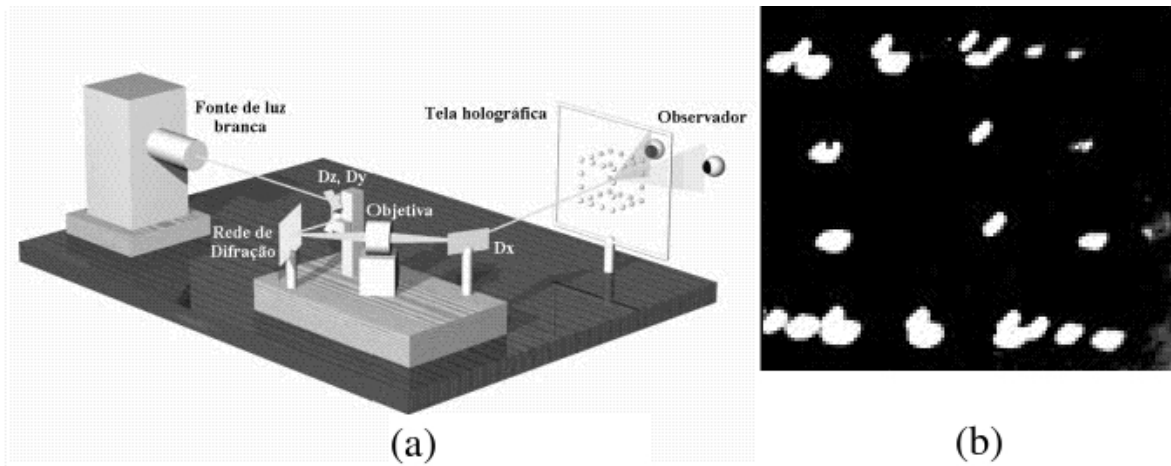


Figura F.6: (a) Sistema vetorial de criação de holoimagens. (b) Cubo gerado pelo movimento de espelhos atravessando a tela.

F.4 Sistema para ampliação de hologramas com luz branca

O sistema de que utiliza tela holográfica horizontalmente dispersiva também já foi utilizado para a ampliação de hologramas [F.3], como mostra a Figura F.7.



Figura F.7: Ampliação de hologramas com tela holográfica.

Referências Bibliográficas

- [F.1] J. J. Lunazzi, Processo para projeção de imagens com paralaxe horizontal sobre tela holográfica, INPI-BR, 9302553-0 (Outubro 2000)
- [F.2] J. J. Lunazzi, Referência de um livro de cinematografia a ser encontrado na biblioteca do IFGW, Unicamp.
- [F.3] J. J. Lunazzi, Enlarging Holograms Under White Light, a Way to Save Holographic Material, arXiv:0905.1157v1 [physics.optics]

Apêndice G

Trabalhos publicados e aceitos durante o doutorado

G.1 Artigos publicados em revistas

Durante o período de tese de doutorado foram publicados os seguintes artigos em revistas arbitradas:

- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, N. I. R. Rivera, and R. L. Serra. *Holo-television system with a single plane*. **Opt. Lett.**, 34:533–535, 2009.
- J. J. Lunazzi, N. I. R. Rivera, and D. S. F. Magalhães, *Imaging with two spiral diffracting elements intermediated by a pinhole*, **J. Opt. Soc. Am. A** 25, 1091-1097, 2008.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, M. C. I. Amon, N. I. R. Rivera, *Simple experiments demonstrating some properties of diffractive lens and spiral gratings*. **Opt. Pura Apl.**, v.41, p.43/ 273 - 50, 2008.
- J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães, *Fazendo imagens com um simples elemento difrativo ou refrativo: o axicon* **Revista Brasileira de Ensino de Física** v. 31,

n. 2, 2501, 2009.

- R. Serra, G. Vega, A. Ferrat, J. Lunazzi, D. Magalhães, *Fundamentación del holograma como un medio de enseñanza de la Física*, **Lat. Am. J. Phys. Educ.**, Vol. 2, No. 3, p. 294-302, 2008.
- R. Serra, G. Vega, A. Ferrat, J. Lunazzi, D. Magalhães, *El holograma y su utilización como un medio de enseñanza de la física en ingeniería*, **Revista Brasileira de Ensino de Física** v. 31, n. 1, 1401, 2009.

G.2 Artigos aceitos para publicação

- J. J. Lunazzi; D. S. F. Magalhães; R. L. Serra *Construction of white-light holographic screens*, aceito em **Opt.Eng.** Julho, 2009.

G.3 Artigos arbitrados publicados em anais de congresso

Durante o período de tese de doutorado foram publicados os seguintes artigos em anais de congresso que passaram por arbitragem:

- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, M. C. I. Amon *Constructing white light holographic screens maximizing its size* In: Riao / Optilas'07, 2007, Campinas. AIP Conf. Proc., 2007. v.992. p.180 - 183
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, N. I. R. Rivera *Didactical holographic exhibit including holoTV (Holographic Television)* In: Riao / Optilas'07, 2007, Campinas. AIP Conf. Proc., 2007. v.992. p.210 - 215

G.4 Trabalhos completos publicados em congresso com resumo estendido

Durante o período de tese de doutorado foram publicados os seguintes trabalhos em anais de congresso:

- D. S. F. Magalhães, J. J. Lunazzi, R. L. Serra, M. C. I. Amon *Construcción de Lentes Difractivas y sus aplicaciones como Pantallas Holográficas* In: Congreso Internacional FISAPLIC 2008, 2008, La Habana.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, M. C. I. Amon, R. L. Serra, *La óptica de imágenes en la extensión universitaria de Unicamp* In: Congreso Internacional EFING 2008, 2008, La Habana.
- R. L. Serra, J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães *A Holografia na extensão universitária em Cuba* In: Segundo Congreso de Extensión Universitaria, 2008, Campinas.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, M. C. I. Amon, R. L. Serra *A óptica de imagens na extensão universitária da Unicamp* In: Segundo Congreso de Extensión Universitaria, 2008, Campinas.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães *Color on white-light three-dimensional images projected on holographic screens by three-chromatic multiple projection: first results for an image point* In: Optics and Photonics Congress - Spring 2008 - Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH), 2008, St. Petersburg.
- J. J. Lunazzi, R. L. Serra, D. S. F. Magalhães *Estereoscópio com tela holográfica para ver tomografias* In: LatinDisplay 2008, integrando os eventos XV InfoDisplay – XIV Seminário BrDisplay – XII Latin SID Seminar – X DisplayEscola, 2008, Campinas.

- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães *Descrição dos sistemas mais atuais de demonstração de imagens tridimensionais a olho nu, do papel das telas holográficas neles, e de sistemas pseudo-3D* In: LatinDisplay 2007, integrando os eventos XIV InfoDisplay – XI Seminário BrDisplay – IX Latin SID Seminar – IX DisplayEscola, 2007, Campinas.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães *Mechanical stabilization of a gas laser interferometric system for making diffractive lenses* In: XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2007, São Lourenço.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães *Photographing by means of a diffractive axicon* In: XXIX Enc. Nac. de Fis. da Mat. Cond., 2006, São Lourenço.
- J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, N. I. R. Rivera, M. Rigon *Holo-Television System with a Single Oblique Plane: First Results* In: XXVIII Enc. Nac. de Fis. da Mat. Cond., 2005, Santos.

G.5 Principais artigos publicados

Nas páginas a seguir encontram-se os principais artigos publicados durante a tese de doutorado. O artigo da Opt.Eng. não está no formato final de publicação, embora o texto esteja.

Holo-television system with a single plane

José J. Lunazzi,^{1,*} Daniel S. F. Magalhães,¹ Noemí I. R. Rivera,¹ and Rolando L. Serra²

¹Laboratório de Óptica, Instituto de Física Gleb Wataghin, P.O. Box 6165, University of Campinas—UNICAMP, 13083-970 Campinas, São Paulo, Brazil

²Departamento de Física, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (Cujae), Avendida 114, 11901, Marianao, Ciudad de La Habana, CP 19390, Cuba

*Corresponding author: lunazzi@ifj.unicamp.br

Received October 3, 2008; revised January 7, 2009; accepted January 13, 2009;
posted January 21, 2009 (Doc. ID 101693); published February 13, 2009

We show a system capable of projecting a video scene onto a white-light holographic screen to obtain a kind of image that results in a plane in front of the screen. This holographic screen is mainly a diffractive lens and is constructed by holography. The image plane can be located at any azimuth angle and seen with continuous parallax and without the use of goggles or any special visualization equipment. The image is not volumetric, but when the plane is oblique to the observer its appearance looks very close to a real volumetric image. © 2009 Optical Society of America
OCIS codes: 110.0110, 110.1758, 050.1970.

An effort to develop a three-dimensional (3D) television (TV) system has been made over the past few years. 3D TV is being broadcast in Japan for the first time in the world. To view, the observer must have a special liquid-crystal-diode (LCD) receptor and wear specific goggles, as with the Hyundai E465S 3D Stereoscopic LCD TV. Also, regular use of these goggles has been shown to cause fatigue [1]. Goggle-less 3D monitors do not have TV capability yet, to our knowledge. A European project on 3D TV capture has been functional since September 2004 [2] but does not point to any display system. In Korea [3] a constant effort concerning online gaming and 3D animation is underway. 3D systems that construct an interference-fringe-pattern structure to be diffracted do not report representing a TV scene [4–6]. Alternative systems present the inconvenience of needing to track the observer's position [7], so being valid for a single observer. Displays made of photorefractive polymers [8,9] offer a dynamic holographic recording material that allows updating of images but at a very low frame rate wherein each complete static scene needs 2.5 min to be recorded, making applications with an animated scene impossible.

Holographic screens had their applications extended to multiple projection and white-light systems [10,11]. This kind of holographic screen allows the decoding on white light of a previously encoded image [12–14]. A previous system described in [15] shows the capability to transmit TV images to be viewed in continuous horizontal parallax only (HPO) without needing any goggles or information on the observer's position, for up to three simultaneous observers at different vertical levels. The HPO is an effective approximation to full-parallax imaging, because humans perceive depth using horizontally offset eyes. Also, a volumetric computer image was created by slicing a 3D animation into planes that appear to be traversing the screen [15]. The planes were sequentially displaced laterally by means of a rotating mirror mounted on a high-speed computer-controlled step motor. This system was tested through extraction of slices of 3D animated images from computer-

generated images. When the many planes were reduced to only one, the possibility of using a simplified TV system that projects a single plane was evident; the image did not look like a strictly plane image. Because depth is present, the visual sensation helps the observer to recognize the elements of a volumetric image.

In this Letter we describe a simplified holo-television system based on a first diffraction process at a grating and a second one at a holographic screen. The holographic screen is characterized, the depth of the image is measured, and some important results for this kind of holo-television system are presented.

The holographic screen is a high-resolution diffractive screen constructed by means of holographic recording; it is mainly an off-axis diffractive lens in which the lens action is employed to define very directionally the viewing position, thus defining multiple scene capability, each scene corresponding to a different viewing position. The observer's field is extended by the action of a thin diffuser, which is the object holographically registered [11]. The scheme to record a holographic screen is shown in Fig. 1. The laser (L) emits a beam that is divided by a beam splitter (BS). One of the beams is reflected by a plane mirror (M) and reaches a spatial filter (SP), causing the beam to diverge. The other beam reaches a cylindrical lens (CL) of focal length 3.8 mm and causes the beam to diverge, creating a diffusion line at the diffuser (D). The angle between the two involved beams was 45°. Each point of the diffuser illuminates the entire holographic film (HF), where the interference pattern is recorded. The holographic film was a holographic silver-halide film Agfa 8E75 HD. When the holographic screen (HS) is illuminated by a diverging white-light beam, each wavelength will converge at a different lateral position and distance, because it creates the diffuser's image, as shown in Fig. 2. The diffuser being only 2 mm wide, if the right eye of the observer is located precisely at the position of the green image of the diffuser, receiving light at the same wavelength from the entire screen, his left eye will receive light corresponding to a wavelength displaced

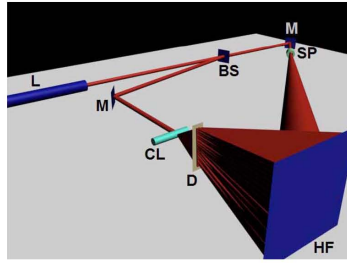


Fig. 1. (Color online) Scheme to record a holographic screen. The laser (L) emits a beam that is divided by a beam splitter (BS). One of the beams is reflected by a plane mirror (M) and reaches a spatial filter (SP), causing the beam to diverge. The other beam reaches a cylindrical lens (CL) of focal length 3.8 mm and forces the beam to diverge, creating a diffusion line at the diffuser (D). The interference of both beams is recorded at the holographic film (HF).

toward the blue, which may come from the entire screen area, because it is composed of the many beams converging toward the eye. The purpose of the diffuser at recording is that it vertically extends the position in which the observer can see the entire scene.

Using a diffraction grating as a spectral encoder of depths to project a 2D image, this image can be located in front, behind [13], or oblique to [16] the screen. Figure 3 shows the schematic settings to generate a floating image. A personal computer with resolution set to 800 pixels $\times$ 600 pixels sends the image to an ordinary 2D multimedia projector (PJ) and projects the image onto the diffraction grating. The projector had its lens inverted to reduce aberrations when the image was focused closer. The image is focused close to the diffraction grating (DG). The first diffraction order is caught by an objective lens (OL) with great aperture and projected onto the holographic screen. This diffraction order appears like a spectral blur on the screen. The width of this spectral blur is the consequence of the distance between the focused image and the diffraction grating and determines the depth in which the observed image will appear. The holographic screen diffraction makes the imaging process complete [14].

The system employs a Sharp XG-H400U multimedia projector, a diffraction grating of 1000 lines/mm

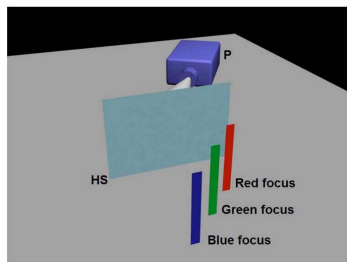


Fig. 2. (Color online) Holographic screen being illuminated by a diverging white-light beam.

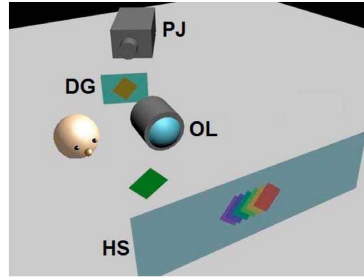


Fig. 3. (Color online) 2D projection of an image in front of the holographic screen (HS). A multimedia projector (PJ) projects an 800 pixels $\times$ 600 pixels image on a diffraction grating (DG) of 1000 lines/mm, and an objective (OL) 1:2.8 with 90 mm of focal length focalizes the first diffraction order of DG on HS. The distance image-HS is (27.0 ± 0.5) cm.

with diffraction efficiency $(13 \pm 1)\%$, and a Pentax Takumar objective 1:2.8 with 90 mm of focal length. The holographic screen used has a focal length of (64 ± 1) cm, a diffraction efficiency of $(23 \pm 1)\%$, and $30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ of size. The involved distances are $\text{PJ-DG} = 21.5 \text{ cm}$, $\text{DG-OL} = 8 \text{ cm}$, and $\text{OL-HS} = 171.8 \text{ cm}$.

The image can be observed in two different ways: the reflected diffraction order and the transmitted diffraction order of the holographic screen. The diffraction efficiency in both cases is almost the same. In our specific case we choose the reflected order to optimize the available room space. Figure 4 shows a frame of a recorded video with a digital video camera and two pictures of the image projected with the system. The center and right pictures of Fig. 4 were captured using a nonprofessional digital camera Olympus X-760, the photographic result being poorer than the effect experienced upon direct viewing.

To find the position of the image, we use a stick as a reference. The camera is put at the position of each eye of the observer. Displacing the stick, when it is at the same line as a selected image point for both viewpoints, the position of the image is found.

Figure 5 shows the position when both eyes observe the stick aligned with the same image of the legs. The corresponding z distance between the holo-



Fig. 4. (Color online) Left, the visualization of the projected video scene; center, the visualization of this frame projected on the holographic screen; right, another part of the same projected video (Media 1).



Fig. 5. (Color online) Left, the left-eye vision of the image; right, the right-eye vision of the image. The comparison between the stick and the image shows that the image is 27 cm in front of the screen.

graphic screen and the image of the man was (27.0 ± 0.5) cm in front of the screen. The observer's field of view at 140 cm from the screen has (24 ± 1) cm, which corresponds to an angular field of $11 \pm 1^\circ$.

The observed image has continuous horizontal parallax, and because the wavelength change is not enough to keep the same color sensation, in each observation point the image appears in a different color; the left image of Fig. 5 can be seen in green and the right image can be seen in blue.

In summary, a holographic screen working on white light was characterized by means of the knowledge of its spatial frequency. We present a system capable of projecting a computer animation or a video scene on a white-light holographic screen to obtain an image with continuous horizontal parallax that results in front of the screen. Color images could be obtained using three projectors in red-green-blue synchrony overlapped at the same holographic screen [17].

References

1. H. O. Li, J. Seo, K. Kham, and S. Lee, in *Optics and Photonics Congress Spring 2008* (Optical Society of America, 2008), paper DWA5.
2. L. Onural, in *Optics and Photonics Congress Spring 2008* (Optical Society of America, 2008), paper DWA1.
3. Seung-Hyun Lee, Ji-Sang Yoo, and Dong-Wook Kim, in *Optics and Photonics Congress Spring 2008* (Optical Society of America, 2008), paper DWA6.
4. M. Lucente, P. St. Hilaire, S. A. Benton, D. L. Arias, and J. A. Watlington, *Proc. SPIE* **1732**, 1732-48 (1992).
5. M. Lucente, *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.* **31**, 63 (1997).
6. T. Honda, M. Shimomatsu, H. Imai, S. Kobayashi, H. Nate, and H. Iwane, *Proc. SPIE* **5006**, 118 (2003).
7. K. Takano and K. Sato, in *Proceedings of Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)* (Wiley, 2006), Vol. 89, pp. 44-52.
8. S. Tay, P.-A. Blanche, R. Voorakaranam, A. V. Tunç, W. Lin, S. Rokutanda, T. Gu, D. Flores, P. Wang, G. Li, P. St Hilaire, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, *Nature* **451**, 694 (2008).
9. N. Peyghambarian, S. Tay, P.-A. Blanche, R. Norwood, and M. Yamamoto, *Opt. Photon. News* **19**, 22 (2008).
10. C. Newswanger, "Real-time autostereoscopic displays using holographic diffusers," U.S. patent 4,799,739 (24 January, 1989).
11. J. J. Lunazzi, Institut National de la Propriété Industrielle, 8907241 (1992).
12. J. J. Lunazzi, *Opt. Eng.* **29**, 9 (1990).
13. J. J. Lunazzi and P. M. Boone, *Opt. Lett.* **19**, 1897 (1994).
14. J. J. Lunazzi and M. Diamand, *Opt. Rev.* **6**, 513 (1999).
15. J. J. Lunazzi, in *Proceedings of the Holographic Display Artists and Engineers Club* (HODIC, 1997), pp. 24-29.
16. E. G. da Fonseca, P. L. de Gues, C. F. X. de Mendonça, J. J. Lunazzi, and E. Bertini, in *Proceedings of the X International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision*, SIBGRAPI'98 (IEEE, 1998), pp. 135-141.
17. J. J. Lunazzi and D. S. F. Magalhães, in *Optics and Photonics Congress Spring 2008* (Optical Society of America, 2008), paper DTuA4.

Construction of white-light holographic screens

José J. Lunazzi* and Daniel S. F. Magalhães†

*Laboratório de Óptica, Instituto de Física Gleb Wataghin, P.O.Box 6165,
University of Campinas - UNICAMP, 13083-970 Campinas, SP, Brazil*

Rolando L. Serra‡

*Departamento de Física, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (Cujae),
Ave. 114, 11901, Marianao, Ciudad de La Habana, CP 19390, Cuba*

Abstract

In this paper we describe one setup employed for the recording of two types of holographic screens that can be used in white-light applications. We show how to obtain holographic screens with areas up to 1370 cm² and diffraction efficiency of 17%. We analyze the holographic screens in their relevant aspects as to focal lengths, theoretical approach, sizes and diffraction efficiencies specifying when each type is appropriate for particular applications.

PACS numbers: 090.0090 090.1970 090.2890

Keywords: holography, holographic screen, three-dimensional imaging

I. INTRODUCTION

The holographic screen [1] is a diffractive optical element (DOE) constructed by holographic techniques in order to obtain the highest directionality such that one projected image can be seen in strictly one direction, while many images can be seen projected simultaneously. It is primarily a holographically-made lens where the vertical and/or horizontal observer's field is extended, allowing for a more comfortable posture of the observer.

The term “holographic screen” is used sometimes in a popular way to designate translucent screens that are used for image projections which produce a phantasmagoric two-dimensional image at the plane of the screen. These screens can be holographically constructed or by other methods. The holographic screens that we will describe here are holographically constructed and are able to produce three-dimensional images.

Most of the white-light applications with the holographic screen are based in a double diffraction process, where the depth of the image is coded by a diffractive element and decoded by the holographic screen [2]. The artist Dan Schweitzer [3] made a simple rainbow Benton hologram to just show to an observer the pure colors it can generate. No three-dimensional object but a plane diffuser was the subject, and color on the whole surface of the hologram changed in a spectral sequence when the observer changed the height of his viewpoint. Steve McGrew made this design popular by producing it embossed [4] and turning it by ninety degrees was the solution found to decode the spectral encoding of depth [5]. This codification-decodification of depth was used to obtain three-dimensional images [6], [7], [8] and an appli-

cation with television purposes was demonstrated [9].

In this work we explain how to obtain holographic screens by holographic techniques that can be used for white-light applications, such as those applications that allow formation of images outside of the plane of the screen [9]. We also analyze different types of installations, optical elements employed in their production reporting a transmission-type holographic screen, with distinct application possibilities than [10], where was achieved the diffraction efficiency of about 17% and maximum size of 1200 cm².

II. WHITE-LIGHT HOLOGRAPHIC SCREENS

Most properties of the holographic screen come from those of a holographic lens. In the recording of a conventional holographic lens the two beams are point sources and their distances to the film characterize the focus of the resulting lens at the wavelength in which the interference pattern is registered [11]. Figure 1 shows the interference of two spherical beams and the distances that characterize the focal length f .

$$f = \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_o} \right)^{-1} \quad (1)$$

After recording, using quadratic approximations to the spherical waves, the distance z_i from the image point to the holographic lens is given [12] by

$$z_i = \left[\frac{1}{z_p} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(\pm \frac{1}{z_r} \mp \frac{1}{z_o} \right) \right]^{-1} = \left[\frac{1}{z_p} \pm \frac{\lambda_2}{\lambda_1} f^{-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

where the upper set of signs applies for one wave and the lower set for a second wave. These two waves are the result of the amplitude transmittance of the developed transparency. λ_1 is the wavelength used during the

*Electronic address: lunazzi@ifi.unicamp.br

†Electronic address: dsouza@ifi.unicamp.br

‡Electronic address: serra@electrica.cujae.edu.cu

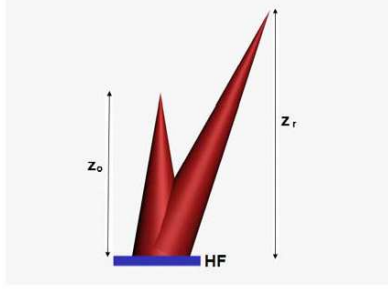


FIG. 1: Interference of two spherical waves in a photosensitive film (HF) resulting in an off-axis holographic lens. z_r and z_o are the distances from the origin of the reference and object beams to the plane of HF.

recording process and λ_2 is the wavelength in the reconstruction. The representation of the distances z_i and z_p are shown in Figure 2, when a monochromatic projector produces a diverging light point that converges as soon as it passes through the holographic lens (HL). This image point becomes the preferred observer's position, where the eye of an observer may receive light coming from the whole surface of the screen, in which images can be produced by using different techniques. The distances z_i from the preferred observer's position to the holographic screen, in the horizontal and vertical types, are given by the same equation (2). Though equation 2 assumes paraxial approximation, this relation continues providing accepted values for angles lesser than 25 degrees between the beams with precision greater than 92%.

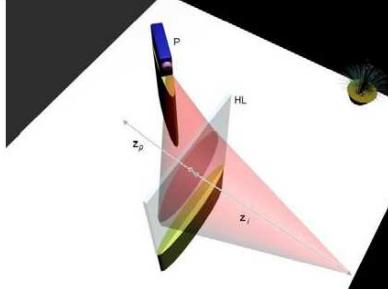


FIG. 2: A monochromatic projector (P) originates a diverging light point that converges as soon as it passes through the holographic lens (HL). z_p is the projection distance and z_i is the focalization distance, both orthogonal to HL.

For angles greater than 25 degrees we should use a more general equation that can be obtained with geometrical approach. The Figure 3 shows two point sources

illuminating a holographic film located at position P and Q. The optical path difference $\Delta l = r + s - t$ is given by equation 3

$$\Delta l = \sqrt{v^2 + u^2 - 2uv\cos\theta} + \sqrt{(x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2 + z_Q^2} - \sqrt{v^2 + x^2 + y^2} \quad (3)$$

where (x_Q, y_Q, z_Q) are the cartesian coordinates of the point Q (Figure 3). When Δl is a multiple of λ we will have an interference maxima, so the equation 4 will define the level curves when solving (x, y) for each n.

$$\sqrt{v^2 + u^2 - 2uv\cos\theta} + \sqrt{(x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2 + z_Q^2} - \sqrt{v^2 + x^2 + y^2} = n\lambda \quad (4)$$

To find the focal length of a holographic lens without approximations, we need to determine the spatial frequency in two points of the lens. With these frequencies known we calculate the trajectories of the diffracted rays when the incident ones reach the lens at the angle of the reference beam during recording, these rays are determined using equation 5. In equation 5 θ_i is the incident angle of the beam reaching the holographic lens in the small part with known spatial frequency ν and θ_d is diffracted angle of this beam. Finally we discover the convergence point by locating the point where the intersection of the diffracted rays occurs. The focal length f is the distance from this point to the lens. The frequencies can be numerically found by the following method:

- Use the equation 4 with all the values employed at the recording and the point $(x = x_n, y = 0)$ of the lens and find n . x_n is the x coordinate of the first point for which we will discover the frequency.
- Calculate $x = x_{n+1}$ to the known $n + 1$ diffraction fringe.
- Calculate the frequency ν by equation 6.
- Repeat this process to find a ν of a different x_n .

$$\sin\theta_i - \sin\theta_d = m\lambda\nu \quad (5)$$

$$\nu = |x_{n+1} - x_n|^{-1} \quad (6)$$

In the white-light holographic screens, the observer's field is vertically extended by the use of a diffuser during the holographic recording, for practicality. We use the label "Horizontally- Dispersive white- light Holographic Screen" (HDHS) for those screens in which the diffractive dispersion occurs horizontally and the diffuser's image is vertical [9] and we use the label "Vertically- Dispersive white- light Holographic Screen" (VDHS) for those

screens in which the diffractive dispersion occurs vertically. These two different holographic screens can be obtained with a simple change in the holographic setup.

The result presented in equation 4 can be extended to find the level curves of a HDHS or a VDHS, assuming each point of the diffuser mutually coherent with the reference beam. First we construct the function that describes the pattern of fringes by drawing a level curve for each n of equation 4, this represents the structure created by one point of the diffuser of the Figure 6. Displacing the coordinates of the point Q in Figure 3 of a small amount we get another group of curves. Numerical mapping the (x,y) coordinates of the superimposed curves, we have the total structure created by the fringes of all the diffuser points. This function can be used to obtain the transmittance function [13] of the HDHS or the VDHS, depending of the choices of the displacements of the point Q .

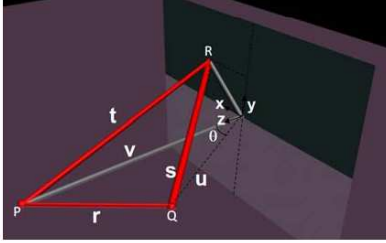


FIG. 3: Interference of two spherical waves.

When the HDHS is illuminated by a diverging white-light beam, each wavelength will converge at a different position because it constructs the diffuser's images, as shown in Figure 4. When a diverging white-light beam illuminates a VDHS, an overlapping of the diffuser's image takes place as shown in Figure 5, which may be conveniently designed to obtain a full color image. A HDHS is employed by laterally projecting a sequence of views being encoded in a spectral sequence of wavelengths. The observer sees this sequence as a horizontal parallax, which may be continuous if the sequence is generated through a diffraction process [1], [6], [7], [8]. A VDHS bases its horizontal parallax on the geometrical position of the projectors, up or down the screen. The parallax may be made continuous by employing a continuous projecting source, as the shadows from a linear horizontal source [14] but one may find a more practical application by using two projectors to make a stereoscopic setup [15].

III. HOLOGRAPHIC RECORDING OF WHITE-LIGHT HOLOGRAPHIC SCREENS

Above we describe the holographic recording method to obtain the two different kinds of white-light holo-

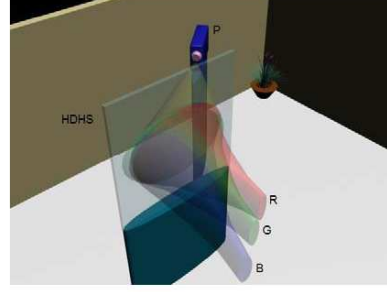


FIG. 4: The horizontally-dispersive white-light holographic screen (HDHS) being illuminated by a diverging white-light beam. R, G and B are the representations of the red, green and blue images of the diffuser.

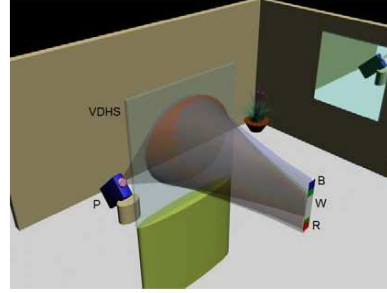


FIG. 5: The vertically-dispersive white-light holographic screen (VDHS) being illuminated by a diverging white-light beam. The projector P illuminates the VDHS and an overlapping of the diffuser's image appears in W. In the edges, the blue (B) and red (R) images are showed.

graphic screens. The used holographic film in these recordings was the Agfa Gevaert 8E75 HD [16] and a stabilized holographic table was employed.

For most applications with white-light is convenient to extend the vertical observer's field [9], the idea of one diverging point [12] can be extended to an array of diverging points in the origin of the object beam. This array could be a diffusing vertical straight line, where each diffusing point of the line illuminates the entire film. The width of this line must be as thin as possible to avoid the overlapping of wavelengths to get the best directionality.

The Figure 6 shows the design of the experimental setup to obtain the horizontally-dispersive white-light holographic screens (HDHS). The collimated beam of an He-Ne laser with power 30 mW (L) is divided by a variable beam splitter (BS), subsequently each beam is reflected by a plane mirror (M). The reference beam reaches the spatial filter (SP) and illuminates the holo-

graphic film (HF). The object beam reaches a cylindrical lens (CL) of focal length 3.8 mm and it makes the beam to diverge creating a diffusion line at the diffuser (D). The diffuser line had 2 mm wide and length of 200 mm. Each diffuser point of the diffuser line illuminates the film. The material that causes the diffusion was a triple layer of plastic sandwiched by two thin glass plates. The employed angle between the rays was 45° .

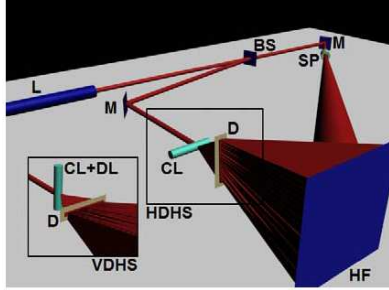


FIG. 6: Experimental setup utilized in the holographic recordings of the horizontally-dispersive white-light holographic screens (HDHS) and the vertically-dispersive white-light holographic screens (VDHS).

To obtain vertically-dispersive white-light holographic screens (VDHS) we just need to rotate the cylindrical lens (CL) by 90° , as can be seen at the left of Figure 6, and introduce a simple diverging lens (DL) closed to CL. The resulting diffuser line had 6 mm wide and length of 200 mm, this small difference in the width of the diffuser line increase the observer's field.

The distances employed in the recording of both holographic screens are presented in Table I.

TABLE I: Distances employed in the recording of the holographic screens

Type of screen	D-HF [cm]	CL-D [cm]	SP-HF [cm]
HDHS	70 ± 1	20 ± 1	237 ± 3
VDHS	58.5 ± 0.5	29 ± 1	237 ± 3

The vertically-dispersive white-light holographic screen (VDHS) must be illuminated from above or from below, which will cause a vertical dispersion of the diffracted light, as can be seen in Figure 5. An application of this screen is a goggle-less stereoscope that could be used in medical applications [15].

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

Using the experimental setups described we obtained HDHS and VDHS. The exposure time was about 40 sec-

onds with the Spectra-Physics He-Ne laser of 30mW. After recording we employed the chemical development described in Table II. The ideal optical density to the Agfa film before the development should be about 2.5 and the time of development is 2 min. Subsequently we utilized two successive bleaching processes as shown in table II [17]. Both processes spend about 2 minutes when the optical density is 2.5.

TABLE II: Chemical development and Bleaching used to Agfa-Gevaert 8E75 HD

Solution A	Solution B
Pyrogallol - 10g	Na_2CO_3 - 60g
Distilled water - 1l	Distilled water - 1l
1st Bleach	2nd Bleach
H_2SO_4 - 1.5 ml	H_2SO_4 - 10 ml
$(NH_4)_2Cr_2O_7$ - 3g	$KMnO_4$ - 0.8g
Distilled water - 1l	Distilled water - 1l

The selection of the angle of $\theta = 45^\circ$ occurs to avoid the overlapping of the zero diffraction order with the first one, which would disturb the observer's view. Using equation 4 and the method described in section II, we determine the theoretic focal lengths of the screens. We measured them by projecting a collimated laser beam with the same wavelength that in the recording with $\theta = 45^\circ$ and we measured the z coordinate of the focalized image point. The values for the HDHS and for VDHS are presented in Table III.

TABLE III: Focal length of the holographic screens to $\lambda=632$ nm

Type of screen	Measured f	Theoretic f
HDHS	85 ± 2 cm	82,2 cm
VDHS	65 ± 2 cm	66,8 cm

The use of the diffuser in the HDHS increases the vertical observation field to 8 cm when the observer is at 2 m in front of the screen in white-light applications. At the same recording conditions except by the diffuser, a conventional holographic lens offers no more than 1 cm of vertical observation field because the observer's field is correlated with the size of the aperture of the projecting apparatus. The obtained diffraction efficiency was $(17 \pm 1)\%$. Though the 45 degrees angle, which could mean a non-negligible Bragg effect and causes a strong dependence of the diffraction efficiency with the wavelength, we measured the diffraction efficiencies for two different wavelengths ($\lambda=632$ nm and $\lambda=520$ nm) and the difference between them is fewer than 2%. The resulting Q-factor for the setup [19] was about 19, this explain the small difference of efficiencies, i.e., the screens have many of the properties of a thin hologram. Due to this small percentual difference we can consider the diffraction efficiency of the white-light holographic screens independent of the wavelength for screens with $\theta < 45^\circ$.

Furthermore, the size of 1370 cm² of both screens allows the projection of large images. The focal lengths of the screens allow the developing of image devices with suitable size [9].

The width of the 8E75HD Agfa film of about 1 meter limits the size of the screens, but in our case the limitation on size is intrinsically linked to the limitation on efficiency due to the wavelength stability of the used He-Ne laser. The bigger the size of the screen, the greater the optical path difference in the interference of the object and reference beams, reducing the diffraction efficiencies because of the movement of the fringes during exposure. One of the authors performed a 1.15 m x 0.80 m screen by using a pulsed laser [20] employed for the enlargement of the holograms.

V. CONCLUSION

In this work we discussed the setup used in the recording of two different types of holographic screens looking

forward their applications with white light as previously published. We showed how to obtain holographic screens of 1370 cm² with diffraction efficiency of 17%. We analyzed the holographic screens in the relevant aspects as their focal lengths, sizes and diffraction efficiencies specifying when each type is appropriate for some kind of developed application.

VI. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thanks A. C. Costa for allowing the use of some dependences of his laboratory, the family Baumbstein for donation of special optical elements and to John R. Smith of the University of California - Davis for the english revision.

-
- [1] J. J. Lunazzi "Procédé et dispositif pour projeter et observer des images différenciées ou stéréoscopiques, dessins, photographies, films cinématographiques ou video", INPI-FR, No 8907241, 1992.
 - [2] J. J. Lunazzi, "3D Photography by Holography," Opt. Eng., vol 29, No.1, p.9-14, 1990.
 - [3] D. Schweitzer, personal communication to J.J. Lunazzi in February 1992
 - [4] Light Impressions, San Jose-CA-EUA, element on catalog from 1984 to 1992
 - [5] J. J. Lunazzi, "Holophotography with a diffraction grating," Opt. Eng., Vol. 29, 15 (1990)
 - [6] J. J. Lunazzi, and P.M. Boone, "3D image projection using large diffraction screens", SPIE 2333, Proc. of the International Symposium on Display Holography, Lake Forest, USA, 1994, p.449-453.
 - [7] J. J. Lunazzi, and P. M. Boone, "One-step technique for enlarging straddling holographic images by white-light projection onto a diffractive screen," Optics Letters, vol. 19, No. 22, 1994.
 - [8] J. J. Lunazzi, "The use of diffractive screens for electronic imaging," Proc. HODIC Circular V17, N1 (Feb. 1997) p.24-29, presented at the meeting of the Japan Association of Display Holography, Tokyo, Japan. Also available at: <http://arxiv.org/abs/physics/0609243v1>
 - [9] J. J. Lunazzi, D. S. F. Magalhães, N. I. R. Rivera and R. L. Serra, "Holo-Television System with a Single Plane," Opt. Lett. 34, 533-535 (2009)
 - [10] V. I. Bobrinev, J.-Y. Son, S.-S. Kim, and S.-K. Kim, "Analysis of color distortions in a transmission-type holographic screen," Applied Optics 44, N. 15 (2005)
 - [11] R. J. Collier, C. B. Burckhardt and L. H. Lin "Optical Holography", 1st edition (Academic Press, New York-USA, 1971) Chapter 2.4
 - [12] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 1st edition (McGraw-Hill, Inc., 1968) Chapter 8.4, pp.214-218
 - [13] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 1st edition (McGraw-Hill, Inc., 1968) Chapter 4
 - [14] J. J. Lunazzi, and N. I. R. Rodríguez, "3D shadowgram projection using a simple diffractive screen," Proc. of the XXIX Enc. Nac. de Fis. da Mat. Cond., São Lourenço, 2006
 - [15] J. J. Lunazzi, R. L. Serra and D. S. F. Magalhães "Estereoscópio com tela holográfica para ver tomografias," in Proc. of the LatinDisplay 2008, Campinas, 2008
 - [16] H. I. Bjelkhagen, Silver-halide recording materials, 2nd edition (Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995) Chapter 3.2
 - [17] Serra et al, "Procedimiento para el procesamiento de hologramas de reflexión con emulsión AGFA GEVAERT 8E75HD", Patent n. CU 22617 A1, Cuba
 - [18] R. J. Collier, C. B. Burckhardt and L. H. Lin "Optical Holography", 1st edition (Academic Press, New York-USA, 1971) Chapter 1.6
 - [19] H. I. Bjelkhagen, Silver-halide recording materials, 2nd edition (Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995) Chapter 2.3.2
 - [20] J. J. Lunazzi, "Enlarging holograms under white light, a way to save holographic material", Holography Vol. 9, No. 2, The Newsletter of the International Technical Working Group-SPIE (1998). Available at <http://arxiv.org/abs/0905.1157>

Biography



José Joaquín Lunazzi was born in La Plata, Argentina, in 1948. He received his M.Sc. degree in 1970 and his Ph.D. degree in 1975, both in physics, from La Plata National University. He constructed his first hologram in 1969 as a consequence of his interest in stereo photography, which he performed at the age of 14. He joined Campinas State University in 1976, working in optical metrology, interferometry and holography. Dr. Lunazzi introduced holographic techniques in Latin America and has taught optics at every level, from postgraduate courses to courses for teachers at secondary and primary levels. He has also taught the use of simple materials in general courses for photographers, university students, artists, and the general public.



Daniel S. F. Magalhães received a B.S. degree in

Physics (2003) and M.S. degree (2005) in Diffractive Optics and Imaging from Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil. He will be submitting for a Ph.D. degree in Aug. 2009 from the same university in the subject of Construction of Holographic Screens and their Applications.



Rolando Serra Toledo received the B.S. degree in Physics (1981) from Instituto Superior Pedagógico Enrique José Varona, M.S. degree in Optics and Lasers (1990) and Ph.D. degree in Pedagogical Sciences (1990), both from Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Cuba. He has conducted trainings in Holography and laser applications in Hungary and Spain. He has performed graduate courses in holography and non-destructive optical testing in Cuba and Spain. He has about 30 international published articles, 3 registered patents in Cuba and has participated in several international projects. He is currently a professor at Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría and the director of the Holographic Research Group in Cuba, which is considered the national leader in the holographic thematic.

Imaging with two spiral diffracting elements intermediated by a pinhole

José J. Lunazzi,* Noemí I. R. Rivera, and Daniel S. F. Magalhães

Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Caixa Postal 6165,
13063-970 Campinas, SP, Brazil

*Corresponding author: lunazzi@ifj.unicamp.br

Received September 26, 2007; revised January 26, 2008; accepted January 29, 2008;
posted March 4, 2008 (Doc. ID 87893); published April 21, 2008

A pseudoscopic (inverted depth) image made with spiral diffracting elements intermediated by a pinhole is explained by its symmetry properties. The whole process is made under common white light illumination and allows the projection of images. The analysis of this projection demonstrates that the images of two objects pointing away longitudinally have the main features of standard pseudoscopic image points. An orthoscopic (normal depth) image has also been obtained with the breaking of the symmetry conditions. © 2008 Optical Society of America

OCIS codes: 050.1970, 090.2870, 110.0110, 110.2990, 110.6880.

1. INTRODUCTION

Images obtained using three diffractive elements were studied and discussed theoretically by Sweatt [1], where it was proposed that the configuration could be used for a lightweight telescope when coupled with a converging lens. Weingärtner and Rosenbruch [2] used a system composed of a diffraction grating and a holographic lens to obtain an image of a far object. A photograph showed a sharp image at 10 nm bandwidth and a rough image when using the visible spectrum. To our knowledge no experimental result has been reported with a three-diffractive-element imaging system.

Lunazzi and Rivera [3–5] previously reported that the pseudoscopic image obtained with diffraction gratings intermediated by a slit converges only in the horizontal plane, thus generating an image which is not astigmatic for visual observation, but in which astigmatism precludes obtaining a convergent image. Reducing the slit to a pinhole eliminates astigmatism but reduces luminosity. Further work has shown [6,7] that convergence of all rays at the image position is obtained with the same geometry with bidimensionally structured diffracting elements and with the replacement of the slit by a pinhole. The chosen diffractive optical element (DOE) was a spiral one that could be considered equivalent to a circular one of constant period [8]. The element constitutes a diffractive axicon [9,10] making a succession of convergent beams along a resulting luminous line. This convergence restores luminosity to the image projection because it concentrates more light at the pinhole position. It was also reported [11] that an orthoscopic image can be obtained.

In this work, the above geometries are analyzed by ray tracing, and focusing experiments are performed. In Section 2 we present the basic formalisms required to describe pseudoscopic and orthoscopic images obtained with two diffracting elements intermediated by a pinhole. The experimental setup for focusing experiments is described

in Section 3. Results and discussion are in Section 4 and conclusions in Section 5.

2. DESCRIPTION

A. Pseudoscopic Image

The diffracting elements we used to observe pseudoscopic images have the spiral groove format because digital data discs perfectly fulfill the requirements. The generation of nondiffracting beams by these elements was previously studied by Ferrari *et al.* [9].

Figure 1 shows the general view of the optical system used to obtain the pseudoscopic image of an object. To explain the imaging properties it suffices to consider that for each ray exiting from a point object, a plane can be selected to determine the image position, which is perfectly symmetric. With this geometry, the existence of light rays can be assured within an extensive region reached by the diffracted light after the first element. As can be seen in Fig. 1, circular symmetry extends the above properties to a family of planes within the whole volume defined by the selected experimental geometry.

We can choose one of these planes for the analysis. Figure 2 shows two object points A and B placed in front of the first diffraction element DOE1. The diffracted light from DOE1 passes through the pinhole P and reaches the identical diffraction element DOE2. In the present analysis the diffraction effects due to the pinhole itself are neglected. The dotted line in Fig. 2 gives the alignment of the DOE1 and DOE2 spiral centers with the pinhole P. It can be seen in this figure that with respect to the pinhole plane, the images A' and B' are symmetrical with A and B.

The whole space can thus be decomposed into a set of oblique planes containing the symmetry axis. The spreading of the diffracted beam that the first diffractive element generates ensures the existence a ray through the

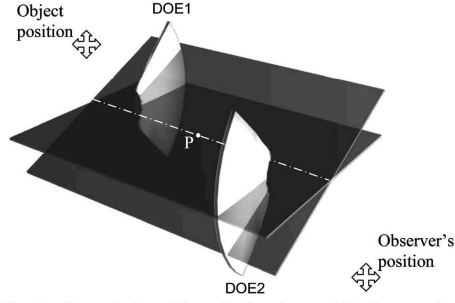


Fig. 1. General view of the optical system and the decomposing of the imaging process through a family of planes corresponding to circular symmetry.

pinhole P. The subsequent diffracted beam due to the second diffraction grating is directed toward the image point. The observer's position can receive rays from only one plane of the kind we selected, that of the plane where it is included. Rays not included in the selected planes undergo conical diffraction [12,13]. The reason rays spreading in different directions are present is that the observation of the whole image is possible from a single point of view. The observer sees the image of points at different planes because of the rays that are not on the planes we selected.

With this geometry, the observer sees a convergent image resulting from first and second diffractions on the same side as its own position, satisfying the general grating equation,

$$\sin \theta_i - \sin \theta_d = \frac{\lambda \nu}{\sin \phi}, \quad (1)$$

where θ_i represents the angle of incidence of light traveling from point A to the first diffracting element, θ_d represents the angle of diffraction for light that travels from points on the diffracting element to point P, ϕ is the angle a ray makes with the tangent to the grooves at the incidence point in case it goes out of the plane of Fig. 2. ν represents the inverse of the grating period, and a specific wavelength value λ is assigned to each ray. It suffices to characterize the image properties to consider ray tracing

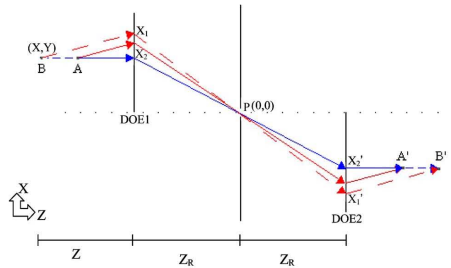


Fig. 2. (Color online) Image formation of two object points A and B.

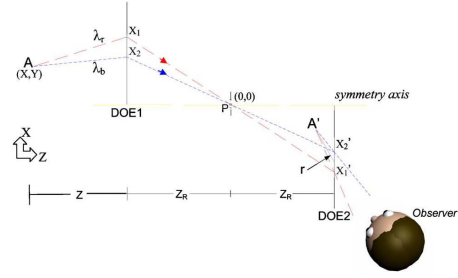


Fig. 3. (Color online) Ray tracing for the image of a point white-light object.

for rays with $\phi=90^\circ$. All other rays converge to the same image point because of symmetry.

As can be expected for white light phenomena, extreme wavelength values are chosen to characterize the ray tracing; all other rays fall within these extremes. For each plane, the light path for the first diffraction can be represented by the set of Eqs. (2) and (3) below that describes the trajectories as if the gratings were straight-line gratings:

$$\begin{aligned} \frac{X_1 - X}{\sqrt{(X_1 - X)^2 + Z^2}} + \frac{X_1}{\sqrt{X_1^2 + Z_R^2}} &= \lambda_r \nu, \\ \frac{X_2 - X}{\sqrt{(X_2 - X)^2 + Z^2}} + \frac{X_2}{\sqrt{X_2^2 + Z_R^2}} &= \lambda_b \nu. \end{aligned} \quad (2)$$

Path calculations obtained after the second diffraction are on the set of Eqs. (3), from which one obtains the position of an image point (X_i, Z_i) of an object point (X, Z) :

$$\begin{aligned} \frac{X'_1}{\sqrt{X'^2_1 + Z_R^2}} + \frac{X_i - X'_1}{\sqrt{(X_i - X'_1)^2 + Z_i^2}} &= -\lambda_r \nu, \\ \frac{X'_2}{\sqrt{X'^2_2 + Z_R^2}} + \frac{X_i - X'_2}{\sqrt{(X_i - X'_2)^2 + Z_i^2}} &= -\lambda_b \nu. \end{aligned} \quad (3)$$

In Eqs. (2) and (3), the ordinates X_1 and X_2 are points at the first grating where the paths for blue and red wave-

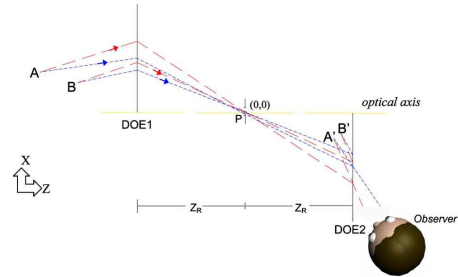


Fig. 4. (Color online) Ray-tracing scheme for the normal depth image.

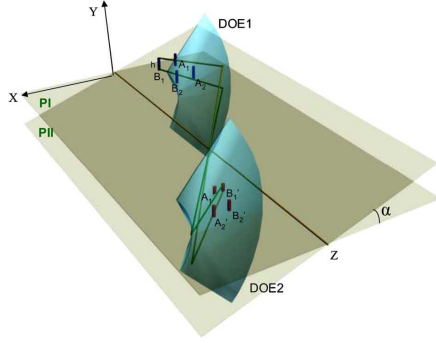


Fig. 5. (Color online) B_1' and B_2' are images of the objects B_1 and B_2 , all of them belonging to planes PI and PII.

lengths are considered, respectively. Z and Z_R are the lengths between the object and DOE1 and between DOE1 and the pinhole, respectively (as shown in Fig. 2). The difference in the signal of the $\sin \theta_d$ in Eq. (1) and the coordinates of Eqs. (2) and (3) follows the convention adopted by [14].

B. Orthoscopic Image

With the above described geometry, an orthoscopic image can be seen when flipping the second DOE and changing the angle for observation. The angle is changed to select the opposite diffraction order. It should be noted that the system geometry remains identical to that described above to obtain a pseudoscopic image. The ray scheme for this situation is shown in Fig. 3.

In Fig. 3, the white-light object A shines on the first of the two diffracting elements that are symmetrically located with respect to the pinhole P. The observer sees a diverging image resulting from these diffractions located between the pinhole and DOE2. As was the case in Subsection 2.A Eq. (2) is valid.

The paths at the second diffraction satisfy Eq. (4), differing only by a signal according to Eq. (3), from which one obtains the position of the image point:

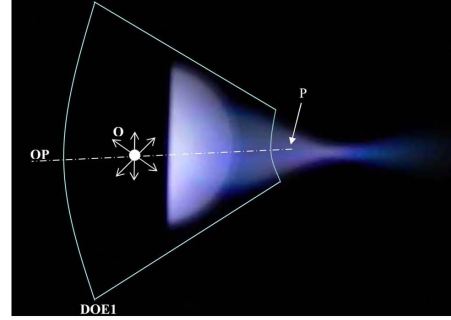


Fig. 7. (Color online) Light distribution reaching the pinhole P.

$$\frac{X'_1}{\sqrt{X'^2_1 + Z'^2_R}} + \frac{X_i - X'_1}{\sqrt{(X_i - X'_1)^2 + Z'^2_i}} = \lambda_i v,$$

$$\frac{X'_2}{\sqrt{X'^2_2 + Z'^2_R}} + \frac{X_i - X'_2}{\sqrt{(X_i - X'_2)^2 + Z'^2_i}} = \lambda_i v. \quad (4)$$

Figure 4 illustrates normal depth on the image for two object points A and B, located at different depth positions. As the figure shows, it was also verified that a shortening of the dimensions on the image happens in one direction along this plane. A left-to-right inversion is also a characteristic consequence of this image formation. Numerical calculations indicate that the image can be viewed binocularly, resembling a holographic image but with a spectral sequence of color change due to the wavelength changes associated with the displacements of the observer point of view.

The image features obtained in the present study with circular gratings are already present in the case of orthoscopic images obtained with ordinary straight-line gratings [5]. It is interesting to note that for both kinds of images, the diffracting elements can be any of a general variety: The major requirements are that the two diffractive elements be identical and that the second element be symmetrically oriented with respect to the line normal to the pinhole, satisfying the above described ray-tracing

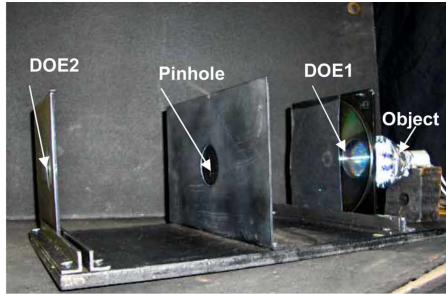


Fig. 6. (Color online) Experimental setup of a double diffraction system with a pinhole.

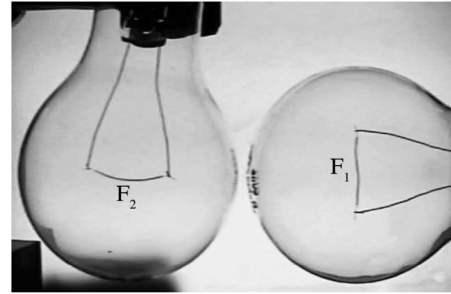


Fig. 8. Photos of the objects F_1 and F_2 used to obtain the pseudoscopic image.

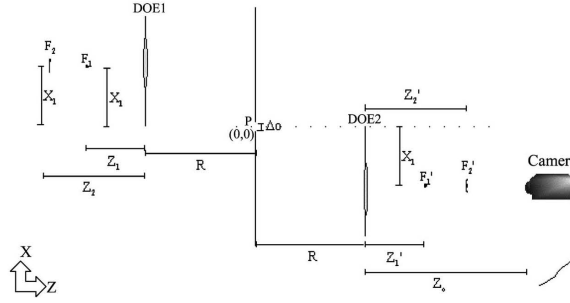


Fig. 9. Schematic view of the apparatus of image formation.

conditions. The more regular the element, the easier the alignment would be. A diffractive or holographic lens pair could bring more luminosity by concentrating the light at the pinhole region.

Rays outside our set of selected planes can reach the pinhole only through conical diffraction. The symmetry condition no longer applies, and this may be the cause of some aberration, an interesting case for further study.

In Fig. 5, there are four objects of height h in pairs at distances Z_1 and Z_2 . The X coordinates of the objects named A or B are X_A and X_B , respectively. Two planes (PI and PII) are shown characterized because they are common to the symmetry axis and include the extremes of the objects B_1 and B_2 . α is the angle between these planes, satisfying the relationship

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{X}\right). \quad (5)$$

These planes determine the extension of the object B_1 and also of its image B_1' . Shown in the figure are the paths of two rays each exiting from the extremes of B_1 until they reach its image.

The light path can be obtained from the following equations:

$$\frac{\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha} - \sqrt{X^2 + h^2}}{\sqrt{\left(\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha} - \sqrt{X^2 + h^2}\right)^2 + Z^2}} + \frac{\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha}}{\sqrt{\left(\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha}\right)^2 + Z_R^2}} = \lambda_{a,v} v, \quad (6)$$

$$\frac{-\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha}}{\sqrt{\left(\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha}\right)^2 + Z_R^2}} + \frac{\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha} - X_i}{\sqrt{\left(\frac{X_{1,2}}{\cos \alpha} - X_i\right)^2 + Z_i^2}} = \lambda_{a,v} v. \quad (7)$$

Table 1. Experimental Checking of the Pseudoscopic Image^a

R	Z_0	Δo	X_1	Z_1	Z_2	Z_1'	Z_2'
130 ± 1	477 ± 1	0.5 ± 0.1	35 ± 1	73 ± 2	122 ± 2	67 ± 3	117 ± 3

^aAll data in mm.

The extension of the image B' is given by

$$h' = X_i \sin \alpha, \quad (8)$$

where X_i is determined by the system of Eqs. (6) and (7). These equations are necessary to completely describe the imaging process.

3. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental system is shown in Fig. 6. The spiral transmission gratings DOE1 and DOE2 are two pieces of a compact disk with spatial frequency of 658 ± 5 lines/mm at any radial distance, generating phase diffraction in the first order with 10.5% efficiency. The elements used in this study were originally transmissive in order to reduce the influence of surface distortion, but a reflective element can often be made transmissive by removing its reflective coating.

The objects employed have high brilliance to facilitate their location and for easily registering images. These objects were filament lamps with transparent bulbs, halogen or ordinary tungsten. A video camera SONY HANDY-CAM CCD-TRV57 with adjustable focus, linked through a webcam Intel CS430 acting exclusively as a capture device, was employed for registering the images on a computer.

Figure 7 is a photograph showing the light distribution generated by the white point object O (a white-light LED) diffracted at DOE1 and reaching a region around the pinhole P. This region of diffracted light is 14 cm wide but only 4.5 cm in depth, corresponding to the first diffraction order selected in the present study. The dashed line identified as OP in Fig. 7 corresponds to the plane previously described in Fig. 2 on which the rays can pass the pinhole P for the subsequent formation of the image.



Fig. 10. (Color online) F_2 at left; image of F_2 (F_2') at right. The defocus of the image of F_1 is visible.

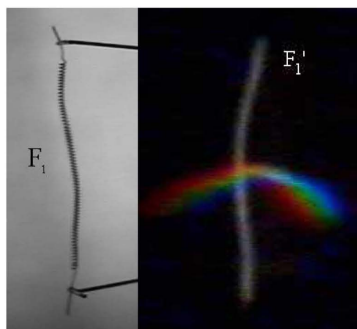


Fig. 11. (Color online) F_1 at left; image of F_1 (F_1') at right. The defocus of the image of F_2 is visible as a spectral dispersion.

4. RESULTS AND DISCUSSION

A. Pseudoscopic Image

Figure 8 shows two tungsten filaments (F_1 and F_2) of 40 W lamps used as objects in this work. The filament directions are roughly orthogonal— F_1 positioned ahead of F_2 —to the observer (camera) situated as shown in Fig. 9; this figure also gives an overall arrangement of the experimental setup. The values of the main ordinates and distances identified in Fig. 9 are given in Table 1. The image of the joint object constituted by the elements F_2' and F_1' is therefore pseudoscopic.

The focused images of each filament are shown in Figs. 10 and 11. It should be noted that these images are inverted in the vertical direction. The spectral dispersion crossing the filament image F_2' (Fig. 10, right) is due to rays that had composed F_1' . The defocused points appear with a chromatic spectrum whose width is proportional to the distance to the symmetry plane. The width of this dispersion retains the information of the depth of the image; this is known as “diffraction depth codification” [15,16].

Using binocular observations to study image depth properties is not possible in the pseudoscopic case because of the restricted angular extension of the image. If the

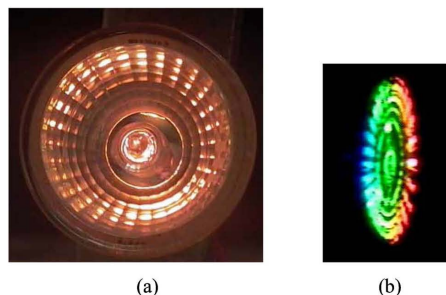


Fig. 12. (Color online) (a) Photograph of the halogen lamp employed as object. (b) Orthoscopic image of the object obtained in our system.

present setup had binocular capability, an observer placed in the position Z_0 of the camera would have seen F_2' in front of F_1' . This is not the case in the present experiment.

In Table 1, one can see that $Z_2' \cong Z_2$ and $Z_1' \cong Z_1$, indicating that the symmetry proposed for the model geometry is experimentally fulfilled.

B. Orthoscopic Image

In the present experimental setup, the observation of orthoscopic images was done with a white-light object: a 20 W halogen lamp with parabolic reflector. This device provided observations of a very bright object, where a fraction of the diffracted light from the first element illuminates the region around the pinhole. Figure 12(a) shows a photograph of the object. Figure 12(b) shows the orthoscopic image obtained at an observer's distance $Z_c = (150 \pm 5)$ mm. This picture shows that the horizontal dimension appears reduced as compared with the vertical, which is in agreement with our ray-tracing analysis (Subsection 4.B.3 below). At object distances close to the first diffracting element this reduction is not noticeable—it appears only when the object is moved away.

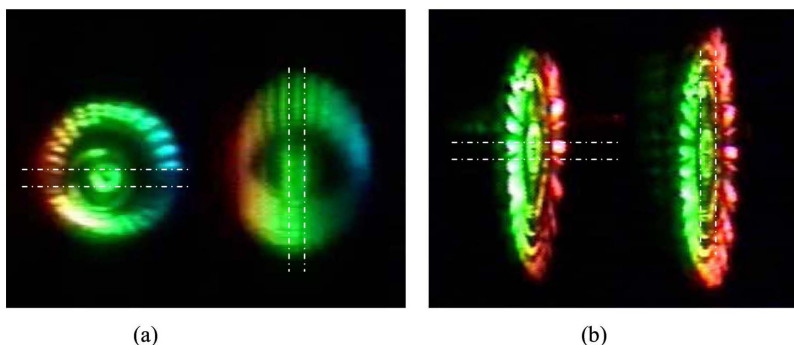


Fig. 13. (Color online) Dashed lines represent the slit position in (a) double-diffracted images for the plane grating case, (b) double-diffracted images for the circular grating case.

Table 2. Comparison between Experimental and Calculated Values of the Image Distance (mm)

Z	r_{exp}	r_{cal}
301 ± 5	29 ± 3	25 ± 1
141 ± 5	23 ± 2	22 ± 1
90 ± 6	20 ± 2	20 ± 1
33 ± 9	10 ± 2	11 ± 2

1. Astigmatism of the Image

The observed astigmatism is attenuated, if not eliminated, as compared with the case of a diffraction grating pair [5] because the chosen diffractive elements act in two dimensions thus forming a richer image. Figure 13(a) shows two images of the same halogen lamp obtained with ordinary straight gratings, while Fig. 13(b) corresponds to the case of the circular gratings. The images at the left in each part were obtained in both cases by covering the 32 mm diameter lens with a slit 1 mm thick oriented orthogonal to the (X, Z) plane. Correspondingly, in images at the right in each part, the slit was located parallel to the X direction. A comparison of Figs. 13(a) and 13(b) shows that the circular gratings provide a significant reduction in astigmatism.

2. Experimental Verification of the Image Position

In the present study, the numerical results of the model geometry were checked by measuring the image position with the focalization scale of a PENTAX-M reflex camera with an ASAHI 50 mm focal length objective. Different object positions were employed with the following input values: $\lambda_o = 500$ nm, $\lambda_v = 700$ nm, $Z_R = (126 \pm 4)$ mm, and $X = (37.0 \pm 0.5)$ mm. The numerical results shown in Table 2 were obtained with Eqs. (2) and (4), using the Mathematica 5.0 software by Wolfram Research.

3. Calculating the Horizontal and Vertical Extension of the Image

Horizontal Extension. In Fig. 5, the two object points A and B are shown with subscripts 1 or 2 indicating their different positions along the Z axis. Once again, Eqs. (2) and (4) were used to determine the horizontal extension ΔX_{iAB} of the image A', B' with the input values $v = 658$ lines/mm, $\lambda_o = 400$ nm, $\lambda_v = 700$ nm, and $Z_R = 126.5$ mm. The calculated values of the horizontal image extension ΔX_{iAB} are shown in Table 3.

The chosen values of $X_A = 40$ mm and $X_B = 30$ mm correspond to an object extension of $\Delta X_{AB} = 10$ mm normal to the "optical axis" through the pinhole P.

Vertical Extension. To calculate the vertical extension h' [Eq. (8)] for two objects whose height is h located at positions $X_A = 40$ mm and $X_B = 30$ mm, the chosen input val-

Table 3. Calculated Values of the Horizontal Image Extension (mm)

$Z_A = Z_B$	X_{iA}	Z_{iA}	X_{iB}	Z_{iB}	ΔX_{iAB}
33	-34.5	7.61	25.9	9.5	8.6
90	-31.3	12.3	-24.4	14.7	6.9
141	-30.3	13.9	-24.5	16.2	5.8

Table 4. Vertical Extension of the Image (mm)

$Z_A = Z_B$	X_{iA}	Z_{iA}	X_{iB}	Z_{iB}	h'_A	h'_B
33	-35.6	7.4	-27.2	9.2	8.6	8.6
90	-32.2	12.0	-25.5	14.3	7.8	8.1
141	-31.0	13.6	-25.4	15.8	7.5	8.0

ues were $v = 658$ lines/mm, $Z_R = 126.5$ mm, $\lambda_o = 400$ nm, and $\lambda_v = 700$ nm. The image extension h' was determined with Eqs. (6)–(8) using the software Mathematica 5.0. The derived results are shown in Table 4. The lengths on the drawing shown in Fig. 5 preserve the scale of these results, i.e., they are drawn to exhibit the two cases of Table 4. In this figure, PI and PII identify the obligatory planes corresponding to the extremes of the object B.

5. CONCLUSIONS

In the present work is demonstrated the feasibility of a new system capable of producing white-light pseudoscopic and orthoscopic diffractive images. Calculations and measurements were shown to be in agreement. The choice of bidimensionally structured diffraction elements makes this system capable of projecting images that are pseudoscopic. Compared with previously reported systems [4,5], the present one permits the observation without astigmatism. This is advantageous since the images can be observed or photographed through a large aperture. In x-ray optics distortionless images can be achieved no matter how large the bandwidth.

REFERENCES

- W. C. Sweatt, "Achromatic triplet using holographic optical elements," *Appl. Opt.* **16**, 1390–1391 (1977).
- I. Weingärtner and K.-J. Rosenbruch, "Chromatic correction of two- and three-element holographic imaging systems," *Opt. Acta* **29**, 519–529 (1982).
- J. J. Lunazzi, "Holoprojection of images by a double diffraction process," presented at XIV Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Caxambu-Minas Gerais, Brazil, May 7–11, 1991.
- J. J. Lunazzi and N. I. R. Rivera, "Pseudoscopic imaging in a double diffraction process with a slit," *Opt. Express* **10**, 1368–1373 (2002).
- J. J. Lunazzi and N. I. R. Rivera, "Pseudoscopic imaging in a double diffraction process with a slit: critical point properties," *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 1021–1026 (2006).
- J. J. Lunazzi and D. S. F. Magalhães, "Diffractive imaging with bidimensional elements: first experimental results," in *Proceedings of XXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, Poços de Caldas, MG, Brasil (May 4–8, 2004), Vol. 1, pp. 127.
- J. J. Lunazzi and D. S. F. Magalhães, "Pseudoscopic white-light imaging by means of two bi-dimensional diffracting elements and a pinhole," *Proc. SPIE* **5622**, 1463–1468 (2004).
- D. S. F. Magalhães, "Estudo de imagens por dupla difração com seleção de luz branca e elementos definidos bidimensionalmente," M.Sc. thesis (Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 2005), <http://www.if.unicamp.br/ccjdr/teses/apresentacao.php3?filename=IF419>.
- J. A. Ferrari, E. Garbusi, and E. M. Frins, "Generation of nondiffracting beams by spiral fields," *Phys. Rev. E* **67**, 036619 (2003).

10. J. J. Lunazzi and D. S. F. Magalhães, "Photographing by means of a diffractive axicon," <http://arxiv.org/pdf/physics/0701234>.
11. J. J. Lunazzi and N. I. R. Rivera, "Orthoscopic imaging in a double diffraction process with slit," in *Proceedings of XXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, Poços de Caldas, MG, Brasil (May 4–8, 2004), Vol. 1, pp. 344–344.
12. E. N. Hogert, M. A. Rebollo, and N. G. Gaggioli, "Alignment and/or tilting measurement by means of conical diffraction phenomena," *Opt. Laser Technol.* **23**, 341–344 (1991).
13. N. I. R. Rivera, "Imagem por dupla difracao com luz branca sem elementos intermediários," Ph.D. thesis (Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 2007), <http://webbif.ifi.unicamp.br/teses/apresentacao.php?filename=IF284>.
14. M. C. Hutley, *Diffraction Gratings* (Academic, 1982), pp. 23–26.
15. J. J. Lunazzi, "3D photography by holography," *Opt. Eng. (Bellingham)* **29**, 9–14 (1990).
16. J. J. Lunazzi, "Holophotography with a diffraction grating," *Opt. Eng. (Bellingham)* **29**, 15–18 (1990).