

Rede de difração holográfica: uma opção eficiente e de baixo custo

(Holographic Diffraction Gratings: an Efficient and Cheap Option)

Valdir C. Colussi

Bolsista FAPESP, PG-Neurociências, FCM/UNICAMP, Cz. Postal 6173, CEP 13.083-970 Campinas-SP

Adriano M. Cansiam

IBILCE São José do Rio Preto, UNESP. R. Cristóvão Colombo, 2265 CEP 15054-000 S.J. Rio Preto-SP

Trabalho recebido em 23 de setembro de 1993

Resumo

Utilizando conceitos básicos de óptica interferométrica e difração da luz foi possível desenvolver um sistema simples de confecção de Redes de Difração Holográficas. Neste trabalho foram produzidas e caracterizadas redes entre 350 e 1300 linhas/mm. Tal desenvolvimento, além de proporcionar um desenvolvimento rico em técnicas ópticas, permite a produção de redes de difração de baixo custo e excelente qualidade que podem ser utilizadas em outras experiências de ensino de física.

Abstract

Using basic concepts of interferometric optics and light diffraction was possible to develop a simple process for building Holographic Diffraction Gratings. In this work, gratings having between 350 and 1300 lines/mm were produced and analyzed. Such development, besides providing a learning too rich in optical techniques, allows one to produce very cheap diffraction gratings with excellent quality which can be used in other experiences of physics training.

1. Introdução

Desde seu surgimento, em 1948, a Holografia vem sendo explorada e aperfeiçoada, como uma técnica de reconstituição de imagens com aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento, variando desde a ciência pura até às aplicações artísticas, indústrias e comerciais. Em muitos destes casos sua prática é difundida, como "segredo tecnológico".

Um holograma, como se sabe, é fundamentalmente uma grade interferométrica, gerada pela superposição de dois feixes de luz coerente (em geral um laser), impressos na emulsão de um filme fotográfico de alta definição. A interferência de um feixe de referência com a luz espalhada de um objeto, sobre o filme, permite-nos codificar a imagem do objeto e posteriormente reconstituí-la tridimensionalmente, sem que este esteja presente. Isto é possível, quando o feixe de referência é posicionado, com relação ao filme revelado, na mesma

condição inicial em que se fez o registro do holograma^[1]. Em contrapartida, se registrarmos a interferência de dois feixes de luz coerente, de uma maneira simétrica, sobre o filme holográfico, confeccionaremos uma rede de difração holográfica. Redes comerciais, são geralmente importadas custando dezenas ou mesmo centenas de dólares ao passo que gasta-se apenas alguns dólares pelos produtos químicos e pela placa ou pelo metro de filme holográfico, que pode ser encontrado em revendedores especializados ou em grandes Universidades e Centros de Pesquisa no país.

Foi pensando na grande utilidade das redes de difração em experimentos de Ensino de física e na facilidade de obtenção do material necessário, que desenvolvemos uma maneira simples e eficiente de se produzir redes de difração holográficas utilizando técnicas elementares de óptica geométrica e óptica física, que podem ser exploradas por profissionais e alunos a nível de

graduação. O resultado deste trabalho pode ser muito gratificante e instrutivo de forma que o experimentador pode utilizar em outros experimentos de física básica (Espectroscopia, por exemplo) a própria rede de difração holográfica produzida por ele.

Pode-se verificar facilmente que o material necessário para a confecção destas redes é de baixo custo (sendo praticamente definido pelo custo do laser) e de excelente qualidade, podendo viabilizar o aprimoramento do ensino de física em Universidades e outras Instituições de Ensino.

2. Aspectos Técnicos

2.1. Rede de Difração

As redes de difração freqüentemente são utilizadas para medir comprimentos de onda e analisar a estrutura e intensidade dos espectros atômicos, estando presentes numa variedade de equipamentos tais como monocromadores, espectrofotômetros e telescópios, dentre outros.

As redes de fase tradicionais, são confeccionadas abrindo-se sulcos (paralelos e igualmente espaçados) em uma placa de vidro com uma ponta de diamante. Estes sulcos, mudam a espessura óptica da rede de modo alternado, produzindo uma variação periódica de fase no feixe de luz que a atravessa^[2].

A técnica de confecção de redes de difração holográfica por sua vez, está alicerçada em conceitos básicos de óptica interferométrica e técnicas de revelação de filme fotográfico; estes aspectos serão vistos em detalhes a seguir.

3. Aspectos Teóricos

3.1. Interferência de 2 feixes

A Fig. 1, mostra dois raios de luz (monocromática e coerente) superpondo-se em um ponto P do espaço (interferência de Young).

Segundo os princípios da interferometria, para que ocorra um máximo de intensidade em P, é necessário que a diferença de caminho óptico ($d \cdot \text{sen} \theta$), entre os raios r_1 e r_2 contenha um número inteiro de comprimentos de onda (λ), ou seja:

$$d \cdot \text{sen} \theta = m \cdot \lambda \quad (1)$$

onde $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ é a ordem da difração.

As franjas (claras e escuras) quando projetadas sobre um filme de alta definição, registram estes padrões

de interferência que contém informações sobre os feixes de origem (holograma).

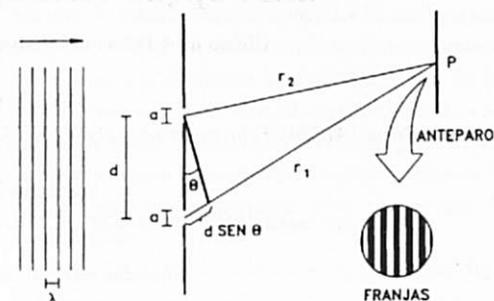


Figura 1. Esquematização de duas ondas coerentes (r_1 e r_2), interferindo em um ponto P do espaço.

3.2. Difração por múltiplas fendas

Difração é o desvio sofrido pela luz ao passar por um obstáculo. Este fenômeno pode ser visualizado facilmente na prática, quando observamos através de uma fina malha ou fenda, uma fonte distante de luz, o sol por exemplo.

Quando um feixe luminoso atravessa uma rede de difração, é como se ele atravessasse um conjunto de N fendas, bastante próximas e equidistantes. O resultado do conjunto de várias fendas pode ser simulado matematicamente, pela extrapolação do conceito de duas fendas, discutido anteriormente.

Caso o feixe luminoso seja fino e monocromático de comprimento de onda λ , observa-se em um anteparo próximo à rede, a formação de uma seqüência de pontos como mostramos na Fig. 2.

Uma análise detalhada destas intensidades (padrões de difração), mostra que na realidade são franjas de interferência moduladas em intensidade por um envoltório de difração, e a posição dos máximos é regida pela equação (1)^[3].

O fato da posição dos máximos numa rede de difração ser regida pela equação (1) possui enorme importância espectroscópica pois incidindo-se um feixe de luz policromática perpendicularmente à rede, esta luz irá se decompor em raios espectrais (cores) que ocuparão uma posição específica que possibilita a determinação da composição atômica da substância analisada; esta é em essência a técnica básica utilizada em espectroscopia.

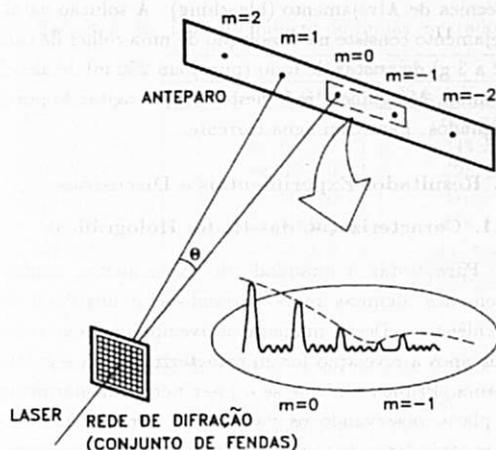


Figura 2. Um feixe laser atravessa um holograma e forma em um anteparo padrões de difração de várias ordens. Cada ponto, a partir do ponto central ($m = 0$) representa as ordens $m = 1, 2, 3...$ respectivamente.

4. Desenvolvimento Experimental

4.1. Sistema Óptico

O sistema óptico é constituído por um laser de He-Ne (Opto Eletrônica; $\lambda = 632,8 \text{ nm}$), operando de modo contínuo, com uma potência de aproximadamente 0,5 mW. A luz passa por um expansor do tipo "Expansor de Gauss"^[3], proporcionando um aumento linear $A = f_2/f_1 = 23$ (Fig. 3). Uma vez expandido, este feixe passa por uma íris que ajusta o diâmetro desejado.

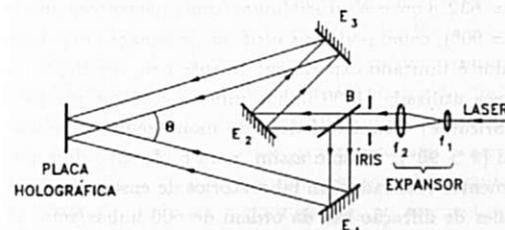


Figura 3. Sistema óptico utilizado na confecção das redes holográficas. No expansor de Gauss foi utilizado $f_1 = 13 \text{ mm}$ e $f_2 = 300 \text{ mm}$, ambas convergentes.

Um divisor de feixe B separa o feixe original em duas partes de mesma intensidade que atingem os espelhos E_1 e E_3 . Os espelhos são ajustados de tal forma que os dois feixes incidam na placa holográfica sobrepostos com um ângulo θ entre eles.

Os filmes holográficos são diferentes dos filmes fotográficos comuns, porque as distâncias entre as franjas no padrão exigem uma resolução da ordem de 10^{-4} metros e, portanto, a granulação de prata existente no filme deve ser capaz de responder a esta alta definição requerida.

4.2. Confeção

Para compreender o registro da rede de difração holográfica sobre a placa, toma-se a equação (1) para $m = 1$, obtendo-se:

$$N = \left(\frac{1}{d}\right) = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \sin\theta \quad (2)$$

N é o número de linhas/mm desejado.

Assim, fixando-se o comprimento de onda para $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, basta ajustar o alinhamento do ângulo θ (Fig.3) de forma a resultar numa rede com número de linhas N desejado. As redes comerciais utilizadas no ensino de física (Bausch & Lomb) possuem cerca de 600 linhas/mm. Estas redes, reproduzem resultados bastante satisfatórios em experimentos destinados a analisar comprimentos de onda emitidos por uma fonte de luz (espectroscopia de gases, por exemplo).

Após o alinhamento do sistema, com a sala escura e com o LASER bloqueado, coloca-se a placa ou o filme holográfico (AFGA 8E/75) com o lado emulsivo voltado para os feixes incidentes.

Nesta etapa, para que o experimentador adquira prática suficiente para produção das redes, é importante realizar alguns testes iniciais com o filme de maneira a otimizar o tempo de exposição em função da intensidade do LASER e obter familiaridade com o manuseio do filme no escuro. Uma maneira bastante simples de se fazer isto é fixar o tempo de exposição em aproximadamente um segundo e acrescentar, sucessivamente, atenuadores de intensidade (filtros neutros) logo na saída do laser até chegar a um bom resultado prático entre tempo de exposição e intensidade de luz que atinge a placa holográfica.

4.3. Revelação

Para a revelação das placas ou filmes holográficos utilizamos o procedimento padrão em uma câmara escura (em escuridão total), com os seguintes tempos:

- 5 minutos no Revelador.
- 30 segundos no Interruptor ("stop bath").
- 4 minutos no Fixador.
- 3 a 5 minutos de lavagem em água.

Secagem natural.

Um fato importante é que os tempos indicados acima devem ser rigorosamente respeitados, pois poucas variações podem modificar o resultado final.

Neste procedimento o revelador reage com a parte do filme que foi sensibilizada pela luz. O interruptor (stop bath) interrompe a ação do revelador e o fixador retira a parte emulsiva que não foi sensibilizada.

As soluções reveladoras utilizadas foram preparadas da seguinte maneira:

REVELADOR

Ingredientes:

250 ml de água destilada a 50°C.

1 g de Metol.

45 g de Sulfito de Sódio.

4 g de Hidroquinona.

26 g de Carbonato de Sódio mono-hidratado.

Os componentes são colocados na ordem indicada acima, mexendo-se até a dissolução total. Em seguida adiciona-se mais água destilada a 20°C até completar 500 ml de volume total. Esta solução é reaproveitável e a validade é de 90 dias.

INTERRUPTOR (Stop Bath)

Diluir 25 ml de Ácido Acético Glacial em 500 ml de água destilada.

FIXADOR

Ingredientes:

120 g de Sulfito de Sódio.

7,7 g de Hiposulfito de Sódio.

6,5 ml de Ácido Acético Glacial.

4 g Ácido Bórico.

5 g de Alúmen de Potássio.

Juntar água Destilada aos componentes acima até completar 500 ml de volume total. Mexer até a dissolução completa dos compostos. A solução pode ser reaproveitada e tem validade de 90 dias.

A observação de um espectro contínuo de luz branca, é a maneira mais simples de diagnosticar se houve sucesso na confecção e revelação da rede de difração holográfica. Isto pode ser feito colocando a rede, após secagem completa, entre uma fonte luminosa de luz branca (lâmpada ou luz do sol) e o olho. O espectro é observado no momento em que se encontra o ângulo de difração.

Técnica de Alveamento

Com sorte, um holograma revelado que sofreu super-exposição pode ser recuperado através da

Técnica de Alveamento (bleaching). A solução de alveamento consiste na dissolução de uma colher de café (2 a 3 g) de cristas de Iodo (puro) em 250 ml de álcool comum. Mergulhe a rede nesta solução agitando por 3 segundos. Lave com água corrente.

5. Resultados Experimentais e Discussões

5.1. Caracterização das Redes Holográficas

Para testar a qualidade do experimento, confeccionamos algumas redes variando-se o ângulo θ de incidência. Desta maneira obtivemos diversas redes que após a revelação foram caracterizadas da seguinte forma: Primeiro, incide-se o laser perpendicularmente à placa, observando os padrões de difração que surgem atrás desta, notando-se as várias ordens que aparecem. Logo após, com auxílio de papel milimetrado e um pouco de trigonometria básica, obtém-se o ângulo formado entre o feixe de ordem zero e o feixe de primeira ordem. A rede produzida deverá satisfazer a equação (1).

A Tabela 1 mostra os resultados das densidades de linhas obtidos para vários ângulos θ (diferentes redes); como podemos observar as redes produzidas correspondem muito bem as expectativas teóricas de confecção, onde torna-se claro que o ângulo θ de registro entre os 2 feixes de interferência representado na equação (1), significará posteriormente o ângulo formado entre a ordem zero e a primeira ordem da rede (Fig. 2).

O valor máximo esperado para N , considerando $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ e $N = 1580$ linhas/mm (que corresponde a $\theta = 90^\circ$), como podemos verificar da equação (1). Este valor é limitado experimentalmente pela resolução da placa utilizada (1500 linhas/mm, dado fornecido pelo fabricante) e características da montagem experimental ($\theta > 90^\circ$). Mesmo assim, para o objetivo de experimentos realizados em laboratórios de ensino, onde as redes de difração são da ordem de 600 linhas/mm, os resultados aqui obtidos se apresentaram extremamente animadores.

6. Verificação da eficiência da Rede produzida

A maneira mais simples e direta de comprovarmos a eficiência da rede produzida é realizando alguns dos experimentos básicos nos quais as redes de Difração são requeridas com frequência, no laboratório de ensino, como veremos a seguir.

Tabela 1: Registro do número de linhas esperado teórico (N_{Teo}) o resultado experimental obtido (N_{Exp}).

Rede	Confecção		Leitura	
	$\theta \pm \Delta\theta(^{\circ})$	$N \pm \Delta N$ (l/mmm)	$\theta \pm \Delta\theta(^{\circ})$	$N \pm \Delta N$ (l/mm)
		(Esperado)		(Experimental)
1	12,60 \pm 0,01	344 \pm 15	11,60 \pm 0,02	318 \pm 31
2	14,60 \pm 0,01	398 \pm 15	14,00 \pm 0,02	383 \pm 31
3	17,30 \pm 0,01	470 \pm 15	17,20 \pm 0,02	466 \pm 31
4	21,30 \pm 0,01	574 \pm 14	21,60 \pm 0,02	581 \pm 30
5	48,20 \pm 0,01	1178 \pm 11	56,30 \pm 0,02	1315 \pm 18
Comercial		570 (fabrica)	20,02 \pm 0,02	546 \pm 29

Tabela 2: Valores experimentais obtidos na comparação da rede Comercial e Holográfica.

Rede	$\theta \pm \Delta\theta(^{\circ})$	$N \pm \Delta N$ (l/mmm)	$\lambda \pm \Delta\lambda(\eta m)$
Comercial	21°15'08" \pm 02"	570 (fabrica)	633,3 \pm 0,3
Holográfica	21°57'47" \pm 02"	581 \pm 30	632,9 \pm 0,3

6.1. Determinação do Comprimento de Onda Difrato

Após o alinhamento de rotina no eixo do espectrometro (Precision Goniometer-Spectrometer SGO 1.1-VEB FREIBERGER PRAZISIONSMECHANIK), com um laser de He-Ne, colocamos a rede de difração comercial (Bausch & Lomb: nominal=570 linhas/mm)^[4] na base do aparelho e medimos o ângulo de difração para 1a. ordem ($m = 1$). Em seguida substituímos a rede comercial pela rede holográfica, e repetimos o procedimento. O resultado é mostrado na Tabela 2.

Nesta etapa foi possível medir a eficiência luminosa das redes obtidas. Utilizando um circuito com fotodiodo acoplado a um voltímetro, realizamos a leitura da intensidade luminosa do laser de He-Ne incidida e difratada. A relação Intensidade média (transmitida/incidente), para as diversas redes produzidas foi de aproximadamente 60%, contra aproximadamente 90% das redes comerciais. Nesse experimento foi possível observar até a 2 ordem de difração sem dificuldades. O resultado pode ser melhorado, se, no momento da confecção das redes, houver menor exposição do laser.

6.2. Determinação da Distância entre as "fendas"

Para se obter a distância entre as fendas sucessivas numa rede de difração, e conseqüentemente o número de linhas/mm, utilizamos uma lâmpada de sódio como padrão e medimos a posição angular das linhas espectrais em 6154,3 A°, 5890,0 A° (Linha intensa do Du-

bleto de Na) e 5682,7 A° para a 1a. ordem. Os resultados estão na Tabela 3.

O coeficiente angular da curva $\sin\theta \times \lambda$, calculado por regressão linear, fornece para nossos resultados um valor de $N = 583 \pm 36$ linhas/mm.

Com já ressaltamos, um fator limitante na rede de difração holográfica é a intensidade luminosa transmitida. Devido a isto, a visualização das linhas espectrais de 2a. ordem foram prejudicadas. Com relação as linhas vermelha e verde, as medidas foram feitas com certa dificuldade.

Tabela 3: Resultados Experimentais para verificação de N . Os valores utilizados de λ são tabelados.

Linha	$\theta \pm \Delta\theta(^{\circ})$	$\lambda(A^{\circ})$
Vermelha	20°27'44" \pm 02"	6154,3
Amarela	19°42'38" \pm 02"	5890,0
Verde	18°59'38" \pm 02"	5682,7

7. Comentários Finais

A produção (confecção) de Redes de Difração Holográficas pode ser um pouco delicada a princípio, pois envolve muitos conceitos e técnicas importantes de Física Experimental, mas os resultados são extremamente gratificantes. Estas técnicas, podemos garantir, são facilmente adquiridas com a prática.

Estas técnicas, além de fornecerem um instrumental muito útil em Óptica Física (a Rede de Difração propriamente dita), proporciona uma suave interação

com situações comuns em Química, Física e Engenharia, sendo portanto um experimento multi-disciplinar que possibilita a ampliação da formação do estudante.

A versatilidade do equipamento, no aspecto do arranjo experimental, tem condições de proporcionar aos professores, estudantes, cientistas e artistas, uma ampla gama de resultados onde podemos ressaltar a possibilidade da produção de redes de difração de baixo custo e o aprendizado e desenvolvimento das técnicas holográficas (produção de hologramas de luz branca^[6]) a serem utilizadas nas mais diversas áreas do conhecimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Tito Bonagamba pela permissão da utilização dos Laboratórios Didáticos de Física do IFQSC/USP, ao Samuel pelas figuras e ao amigo Amauri Gentil, técnico dos Laboratórios de Física Avançada, pela amizade e pelo auxílio nas montagens experimentais.

Referências Bibliográficas

1. Lunazzi J.J.; "A Luz Congelada"; Ciência Hoje, 3 (16), Jan/Fev, 1985.
2. Halliday D, Resnick R; *Física - II*; Ao livro técnico S.A.; Rio de Janeiro, 1966.
3. Zajac A, Hecht E; *OPTICS*; Addison-Nesky Publ. Company; New York; USA, 1973.
4. Lower EG; *Diffraction grating handbook*, Bausch & Lomb; 4ed. 1977.
5. Ackermann G, Eichler J, Lesche B, Rosowski G; "Um arranjo simples e instruções para produzir hologramas de luz branca"; Rev. de Ensino de Física; Vol.11, Dez. 1989.