

Fendas Microlitografadas para Experiências de Difração da Luz

Microlithographic Slits for Light Diffraction Experiments)

J. H. Vuolo, V. P. Mammana, J. M. V. Martins

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Caixa Postal 66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP Brasil

Curt E. Hennies

Instituto de Microeletrônica- Centro Tecnológico para Informática (IM/CTI)

Rodovia D. Pedro I, km 143,6, 13089-500 Campinas, SP Brasil

M. R. Spínola Pereira

PETROBRAS/CENPES/DIGER Cidade Universitária, Av. 1, Quadra 7, Ilha do Fundão,

21949-900, Rio de Janeiro, RJ Brasil

Recebido em 28 de Junho, 1999

Neste artigo descrevemos a fabricação de fendas e orifícios em placas de vidro revestidas de cromo, para demonstrações e experiências didáticas sobre difração e interferência da luz. As placas foram feitas no IM/CTI, por meio de técnicas microlitográficas utilizadas em microeletrônica. Cada placa tem conjuntos de fendas simples, fendas duplas, fendas múltiplas e orifícios circulares, quadrados, retangulares e triangulares.

In this paper, we describe the fabrication of apertures and slits in plates of soda lime glass coated with chrome, for use in light diffraction and interference experiments and classroom demonstrations. The plates were made at IM/CTI, by microlithographic techniques that are used in microelectronics technology. Each plate has several sets of single slit, double slits, multiple slits and circular, rectangular and triangular apertures.

I Introdução

As experiências de difração e interferência da luz em fendas e orifícios são tradicionalmente realizadas em disciplinas experimentais de física básica. Usualmente, estas experiências são feitas com o laser de He-Ne. Atualmente, o laser diodo visível (laser pointer) se tornou extremamente acessível, o que torna bastante simples as demonstrações em salas de aula.

Placas com fendas e orifícios para difração podem ser obtidas de várias maneiras, uma das quais consiste em “riscar” a pintura ou fuligem de uma placa de vidro, como descrito em [1], por exemplo. Um outro método consiste em registrar as fendas e orifícios num filme fotográfico a partir de fotografia ou contacto ótico. No caso de fotografia, as imagens registradas no filme podem ser bastante reduzidas, conforme a resolução do filme e a qualidade da objetiva. As imagens das fendas e orifícios podem ser simples desenhos ou podem ser

geradas por métodos mais elaborados. Por exemplo, as imagens podem ser produzidas num tubo de raios catódicos especial (charactron), tal como descrito em [2]. As fendas atualmente utilizadas em disciplinas experimentais do IFUSP são comercializadas pela Pasco Scientific [3] e são produzidas por processo de eletroformação de níquel (“electroforming”). Estas fendas têm um custo relativamente alto (cerca de \$ 60 cada slide com 4 figuras) e ficam inutilizadas depois de alguns anos devido a deformação da folha de níquel e algum processo de formação de fungos e corrosão, que ainda não foi muito bem diagnosticado. Um outro inconveniente é que existem apenas 4 figuras em cada conjunto e os conjuntos são absolutamente iguais. Isto traz alguns inconvenientes didáticos, tanto do ponto de vista de avaliação quanto do ponto de vista de motivação dos alunos, uma vez que os resultados obtidos são todos iguais.

Tabela 1 - Elementos difrativos do slide 1. Distância cc é a distância de centro a centro.

| Posição | Descrição | Dimensões em μm |
|---------------------|--|---|
| M_{11} | 1200 orifícios dispostos aleatoriamente em $2 \times 2 mm^2$ | diâmetro : 6 |
| M_{12} | 9 orifícios circulares | diâmetros : 20, 40, 80, 120, 160, 200, 250, 300, 400 |
| M_{13} | 3 orifícios retangulares (repetidos 3 vezes) | largura \times altura : 50 \times 75, 80 \times 120, 100 \times 150 |
| M_{14} | 3 orifícios quadrados (repetidos 3 vezes) | largura \times altura : 50 \times 50, 100 \times 100, 150 \times 150 |
| M_{15} | Matriz 15 \times 15 | 70 \times 70 |
| M_{16} | de 225 orifícios quadrados | distância cc : 105 |
| M_{21} a M_{26} | 9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros) | Raios : 10, 20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 200 |
| M_{31} a M_{36} | Fendas simples de 4 mm de altura | larguras : 7, 13, 26, 52, 104, 208 |
| M_{41} a M_{46} | Fendas duplas de 4 mm de altura | largura \times distância cc : 26 \times 130, 26 \times 234, 26 \times 338, 37 \times 148, 37 \times 259, 37 \times 370 |
| | Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas) | Largura : 24 Distância cc : 96 |

Uma outra técnica, que é a utilizada neste trabalho, é a gravação de fendas e orifícios no revestimento metálico de uma lâmina de vidro. Resumidamente, obtém-se uma placa matriz, na qual as figuras são gravadas no revestimento metálico de uma placa de vidro por meio de varredura de feixe de elétrons, conforme técnicas padrões utilizadas em microeletrônica. A partir da placa matriz podem ser geradas cópias por método de contacto ótico. A matriz gravada conforme dimensionamento feito neste trabalho tem 8 conjuntos completos de figuras (8 slides) com diferentes dimensões para vários elementos difrativos. Além disso, cada slide tem uma variedade bem maior de figuras que os similares comerciais, podem ser fabricadas no IM/CTI com custo menor e com uma previsão de durabilidade bem maior.

II Descrição das placas

A Fig. 1 mostra as fendas e orifícios escolhidos para serem gravados em cada slide. Depois de cortado, cada slide de vidro tem $34,5 \times 34,5 mm^2$, aproximadamente. Os elementos difrativos de um dos slides são descritos na Tabela 1, onde M_{ij} indica a posição do elemento na Fig. 1. Esta figura é apenas esquemática,

uma vez as posições dos elementos são aproximadas e as dimensões das fendas, orifícios e espaçamentos são apenas representações esquemáticas. As dimensões dadas na Tabela 1 são para um dos slides. As dimensões para cada um dos 8 slides da placa matriz é apresentada em outro texto [4].

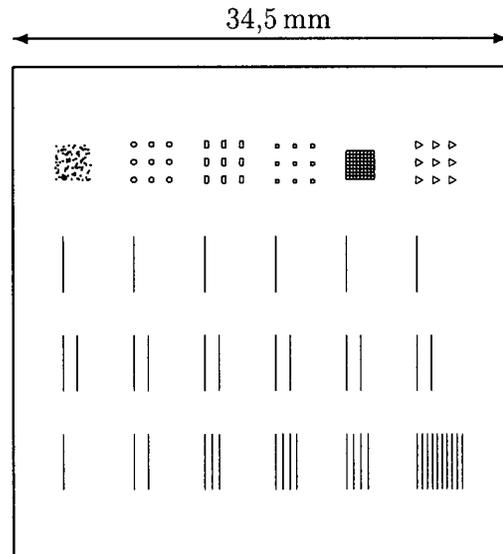


Figura 1. Representação esquemática dos elementos difrativos gravados em cada slide.

Os elementos da 2ª linha (M_{2j}) são fendas simples de 4 mm de altura. Os elementos da 3ª linha (M_{3j}) são fendas duplas. Os elementos da 4ª linha (M_{4j}) são fendas múltiplas com 1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas, respectivamente. Diversos tipos de orifícios foram dispostos na 1ª linha. O elemento M_{11} é um conjunto de 1200 orifícios distribuídos aleatoriamente num quadrado de $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Este elemento é discutido mais detalhadamente na sequência. M_{12} é um conjunto de 9 orifícios circulares distanciados de forma que cada um deles pode ser atingido individualmente por feixe de laser. Os elementos M_{13} , M_{14} e M_{16} são conjuntos de 9 retângulos, 9 quadrados e 9 triângulos, respectivamente. Finalmente, o elemento M_{15} é uma matriz de 15×15 orifícios quadrados regularmente espaçados.

Todas as fendas, orifícios e associações escolhidas são detalhadamente discutidas em livros de ótica tais como [5] e [6], por exemplo. Por isso, as figuras de difração resultantes não serão discutidas aqui. Apenas é discutida a seguir a luminância do espectro de difração para um orifício pequeno. Esta questão não é usualmente tratada em detalhes nos livros de ótica e as estimativas permitiram determinar o tamanho dos orifícios, especialmente os do elemento M_{11} .

Tabela 2 - Regimes de adaptação do olho humano.

| Regime de adaptação | Luminância L (cd/m^2) |
|--|-----------------------------|
| Condições fotópicas (visão diurna) | $3 < L < 10^6$ |
| Condições mesotópicas (penumbra) | $10^{-3} < L < 3$ |
| Condições escotópicas (visão noturna) | $10^{-6} < L < 10^{-3}$ |

II.1 Difração em orifício circular

O primeiro mínimo de difração num orifício circular de diâmetro a ocorre para ângulo θ dado por

$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{a}. \quad (1)$$

Isto significa que, para se obter um anel de difração razoavelmente grande, o orifício deve ser muito pequeno, resultando em intensidade muito baixa. Por exemplo, para $a = 6 \mu\text{m}$, resulta $\theta \approx 7,4^\circ$ para o laser de He-Ne ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$). Para um feixe de 1 mW e cerca de 1 mm^2 , a potência ótica transmitida pelo orifício é $\sim 3 \times 10^{-5} \text{ mW}$. Se a figura de difração é projetada numa tela a 20 cm do orifício, a irradiância média (incidente) na tela, para o disco central de difração é $\sim 1,4 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Admitindo que

a tela seja totalmente refletora e perfeitamente difusora (superfície lambertiana), a radiância média da tela é $\sim 2,3 \times 10^{-6} \text{ W/sr m}^2$. Como ordem de grandeza, pode-se admitir que a intensidade máxima seja 2 vezes maior que a média. A intensidade máxima do primeiro anel de difração é $\approx 1,75\%$ da intensidade máxima do disco central [5]. Como ordem de grandeza, a radiância média correspondente é $R_\lambda \sim 8 \times 10^{-8} \text{ W/sr m}^2$. A eficiência luminosa do olho humano para a luz do laser de He-Ne é $k_\lambda = 0,24$ ([7], por exemplo). Assim, a luminância da tela para o primeiro anel é da ordem de

$$L_\lambda = (683 \text{ lm/W}) k_\lambda R_\lambda \sim 13 \times 10^{-6} \text{ cd/m}^2. \quad (2)$$

A Tabela 2 resume os 3 regimes de adaptação do olho humano. Deve ser observado que, em condições normais, é extremamente difícil atingir o regime de “visão noturna” (condições escotópicas). Mesmo numa sala escura comum, usualmente as luminâncias são maiores que o limiar para condições escotópicas, exceto se a sala é extremamente bem vedada contra luz ambiente externa. No regime de visão escotópica, o olho humano não percebe cores e a adaptação perfeita do olho demora cerca de 30 minutos em ambiente totalmente escuro.

Nas condições consideradas, o primeiro anel de difração para orifício de $6 \mu\text{m}$ só é visível em condições escotópicas. Assim, os anéis de difração não são visíveis em condições normais, numa sala escura comum. Eventualmente, poderiam se tornar visíveis com cuidados excepcionais para adaptação do olho e vedação da sala contra luz externa e a do próprio feixe de laser incidente.

Um recurso para observar mais facilmente o espectro de difração de um orifício pequeno é multiplicar o número de orifícios. Se o feixe atinge N orifícios, a luminância média do espectro de difração fica multiplicada por N . Entretanto, o espectro de difração fica modulado pelo espectro de interferência correspondente à distribuição dos orifícios. Uma maneira de evitar modulações regulares na intensidade do espectro de difração é considerar orifícios distribuídos aleatoriamente. Resulta um espectro de interferência constituído de máximos e mínimos também distribuídos aleatoriamente. Em resumo, aparece essencialmente um espectro de difração, exceto que a aparência se torna granulosa, devido à interferência. Desde que não exista regularidade na modulação devida a interferência, a visão humana identifica apenas o espectro de difração do orifício circular com aparência granulosa.

No exemplo considerado, se o feixe de laser atinge cerca de 300 orifícios, a luminância do primeiro anel seria $L_\lambda \sim 4 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$. Isto corresponde ao regime

de adaptação do olho às condições usuais de uma sala escura (condições mesotópicas ou penumbra).

Para obter 300 orifícios por mm^2 , 1200 orifícios foram dispostos aleatoriamente num quadrado de $4mm^2$. Deve ser observado que admitiu-se que o feixe de laser tem $1mm^2$. Entretanto, as estimativas acima independem desta hipótese. Isto é, o número de orifícios atingidos é proporcional à área do feixe, mas a intensidade transmitida pelos orifícios é inversamente proporcional a esta área.

Devido às limitações do processo de gravação das placas, os orifícios circulares, na realidade, foram gravados como polígonos regulares de 32 lados.

Nos diferentes slides, existem orifícios com diâmetros de 6, 7 e $8\mu m$. Conforme mostrado, mesmo para 300 orifícios/ mm^2 , o espectro de difração só é visível em ambiente escuro.

II.2 Distribuição aleatória dos orifícios

Os orifícios devem ser distribuídos de maneira bastante aleatória, uma vez que qualquer correlação nas posições dos orifícios pode resultar em algum padrão regular na modulação do espectro devida à interferência. Isto pode tornar o espectro de difração inconveniente do ponto de vista didático.

As posições aleatórias dos 1200 orifícios foram geradas segundo um processo pontual de Poisson (Poisson point process, [8]). Um programa computacional [9] permitiu simular um processo pontual de Poisson com intensidade constante no plano e precisão da ordem de 1%. Na simulação do processo de Poisson com intensidade constante, a posição dos pontos é obtida pela simulação de 2 variáveis aleatórias com distribuição uniforme, uma para cada coordenada do ponto.

III Fabricação das placas e suportes

A placa matriz com 8 slides semelhantes ao da Fig. 1 foi gravada por meio de varredura por feixe de elétrons. Para elaboração da placa matriz [10,11], utiliza-se uma placa de vidro de baixo coeficiente de expansão térmica, de alta planicidade e baixa rugosidade, revestida com uma camada de cromo e uma camada de eletro-resiste, que é um polímero que pode ser sensibilizado por elétrons. Os padrões desejados são gravados na camada de eletro-resiste por meio de varredura de feixe de elétrons (eletron beam), realizada na máquina Leica-Cambridge EBMF 10.5 Microfabricator. A seguir, a placa matriz passa por várias etapas de tratamento que, resumidamente, retiram o eletro-resiste sensibilizado e, em seguida, corroem a camada de cromo exposta.

A partir da placa matriz, podem ser obtidas cópias por meio de processo de contacto ótico [12,11]. A cópia é feita numa placa de vidro revestida de cromo e uma camada de foto-resiste, que é um polímero cuja solubilidade pode ser aumentada por exposição à radiação ultravioleta. Assim, a cópia pode ser feita colocando as placas em contacto e expondo à radiação. Para revelação, o foto-resiste sensibilizado é dissolvido e em seguida é feita a corrosão do cromo exposto.

Finalmente, cada cópia é cortada com uma serra especial para microeletrônica, obtendo-se os 8 slides.

A acurácia do processo todo é da ordem de $1\mu m$. Assim, esta é a estimativa para a acurácia dos valores dimensionados em projeto para as figuras.

Para examinar espectros de fendas ou matrizes de orifícios, não é muito importante usar um suporte muito preciso. Entretanto, para observar espectros de orifícios circulares, retângulos, quadrados e triângulos individuais, é conveniente ter um suporte que permita um ajuste fino das posições horizontal e vertical do slide.

Um suporte para movimento vertical da placa foi construído no IFUSP. Este suporte é fixado magneticamente num trasladador comercial simples (Optron, Campinas, SP), para movimento horizontal. Cada slide é montado numa moldura de acrílico de $3mm$ de espessura, que por sua vez é fixada magneticamente no suporte mecânico, como mostrado na Fig. 2.

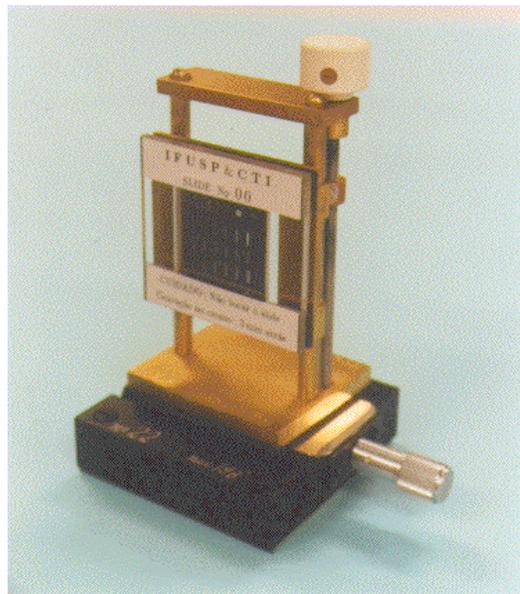


Figura 2. Slide montado no suporte mecânico.

IV Resultados e conclusões

A Fig. 3 mostra fotografias de espectros obtidos com laser de He-Ne para orifícios retangular e circular. A Fig. 4 mostra espectros de difração para fendas simples, dupla e tripla. Nesta última, máximos secundários fracos são visíveis entre máximos principais bastante intensos. Máximos secundários também são visíveis nas demais fendas múltiplas. A Fig. 5 mostra o disco central de difração para o elemento M_{11} com 1200 orifícios em posições aleatórias. A aparência ovalizada do disco se deve à posição oblíqua da câmara para obtenção da fotografia. Os anéis de difração são visíveis em ambiente escuro, mas não aparecem na fotografia devido a intensidade muito baixa. Conforme discutido na Seção 2.1, o espectro tem aparência granulosa.

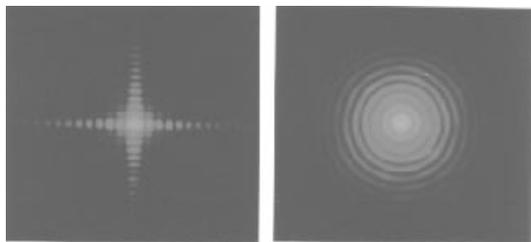


Figura 3. Espectros de difração em orifícios retangular e circular.

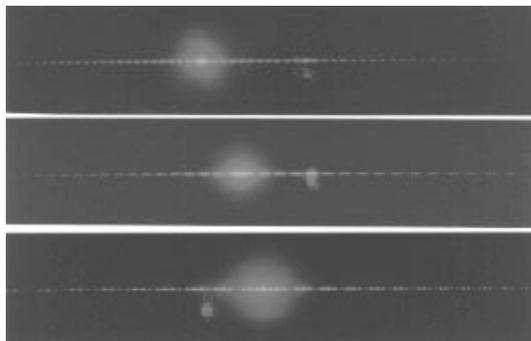


Figura 4. Espectros de difração para fendas simples, dupla e tripla.

A qualidade dos espectros de difração obtidos com as placas fabricadas pelo método descrito pode ser considerada excelente, melhor que a das fendas eletroformadas e bem superior às obtidas por métodos fotográficos. A qualidade das fendas pode ser avaliada do espectro de difração de fenda simples, para a qual são visíveis cerca de 80 franjas em ambiente razoavelmente escuro. Além disso, podem ser visualizados 44 espectros diferentes para cada slide, com a vantagem adicional de se ter 8 slides com diferentes dimensões para vários elementos difrativos (fendas e orifícios aleatórios).

Um pequeno inconveniente resulta do fato que o revestimento de cromo do slide não bloqueia totalmente

a luz do laser. Uma pequena fração da ordem de 1% do feixe de laser é transmitida pelo cromo. Na Fig. 5, o ponto central corresponde a esta fração transmitida do feixe. Quando se usa um diodo-laser, com feixe da ordem de 3 mm, a observação de franjas de interferência estreitas e próximas da franja central fica um pouco prejudicada. Nestes casos, o problema pode ser reduzido colocando o anteparo de observação a uma distância, maior.

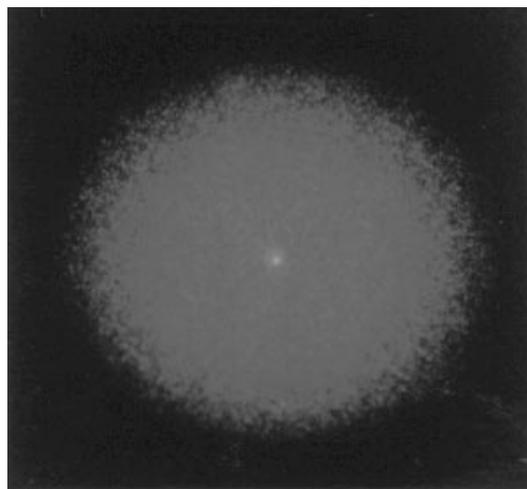


Figura 5. Disco central de difração no elemento M_{11} com 1200 orifícios em posições aleatórias.

No IFUSP, as experiências de interferência e difração são feitas, em cada ano, por cerca de 1500 alunos de Engenharia, Física, Geofísica, Matemática, Química, Farmácia e Biologia e outros cursos. Para atender a esta demanda, foram fabricadas 5 cópias da placa matriz, resultando num total de 40 slides.

O custo de 4 slides eletroformados importados com 4 fendas simples, 4 fendas duplas, 4 fendas múltiplas e alguns orifícios e matrizes de orifícios é maior que \$200. Cada um dos slides que obtivemos, tem maior número de elementos difrativos e o custo do material é bem menor, mesmo se for incluído o custo da placa matriz. Com a placa matriz disponível, as cópias podem ser fabricadas a um custo menor ainda.

A placa matriz está disponível no IM/CTI para eventuais interessados na obtenção de cópias, mediante consulta prévia quanto a custo e disponibilidade para se fabricar as cópias.

Deve ser observado que a qualidade dos espectros é melhor com um laser de He-Ne. Entretanto, espectros satisfatórios também podem ser obtidos com um laser-diodo comum (laser pointer). Estes lasers estão se tornando extremamente acessíveis, com custo da ordem de \$5 no mercado internacional. Assim, dispondo de slides com elementos difrativos a custo razoável, as experiências se tornam bastante acessíveis.

Agradecimentos ao Prof. Carlos Ignácio Zamitti Mammana, Diretor do Instituto de Microeletrônica do CTI.

Agradecimentos a Manoel Moura da Silva e Claudio H. Furukawa, pela elaboração dos suportes das fendas.

Referências

1. Physical Science Study Committe (PSSC), *Física - Parte II*, Editora Universidade de Brasília (1964).
2. R. B. Hoover, *Diffraction plates for classroom experiments*, Am. J. Phys. **37**(9), 871 (1969).
3. *1994 Pasco Scientific Catalog*, Roseville, California (1994).
4. J.H. Vuolo et al., *Fendas óticas microlitografadas para experiências didáticas no IFUSP*, Publicação Interna IFUSP, IF-1341/99, São Paulo (1999).
5. E. Hecht and A. Zajac, *Optics*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company (1987).
6. R. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley, New York (1990).
7. B. Bahadur, *Display Parameters and Requirements*, in *Liquid Crystals, Applications and Uses, Vol.2*, B. Bahadur (Editor), World Scientific, (1993).
8. D. H. Stoyan, *Fractals, Random Shapes and Point Fields, Methods of Geometrical Statistics*, John Wiley and Sons (1994).
9. M. R. S. Pereira, *Processos de Poisson duplamente estocásticos na caracterização de reservatórios fraturados*, *Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas, Campinas (1998)*.
10. *Fabricação por Feixe de Elétrons de Máscaras e Reticulos-Processo 1EB/Versão 1.02*, *Relatório Interno IM/LL, Fundação Centro Tecnológico para Informática, Campinas (1995)*.
11. V. P. Mammana, *Membranas Porosas Auto-Sustentadas de Diamante*, *Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo (1996)*.
12. *Fabricação Óptica de Máscaras e Reticulos-Processo 1OP/Versão 1.0*, *Relatório Interno IM/LL, Fundação Centro Tecnológico para Informática, Campinas (1994)*.