

SBI/IFUSP  
BASE: 04  
SYS Nº: 1080897

Instituto de Física  
Universidade de São Paulo

**Fendas óticas microlitografadas para  
experências didáticas no IFUSP**

Vuolo, J. H.; Mammana, V. P.; Martins, J. M. V.;  
Hennies, C. F.; Pereira, M. R. S.

Publicação IF - 1341/99

# Fendas óticas microlitografadas para experiências didáticas no IFUSP

(28 de Janeiro de 1999)

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

*Instituto de Física, Universidade de São Paulo  
Caixa Postal 66 318, 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*

## Resumo

Neste relatório descrevemos o dimensionamento e construção 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 fabricadas no IM/CTI, por meio de técnicas litográficas utilizadas em microeletrônica. Cada placa tem conjuntos de fendas simples, fendas duplas, fendas múltiplas e orifícios circulares, quadrados, retangulares e triangulares. As placas se destinam a realização demonstrações e experiências didáticas em disciplinas do IFUSP.

## 1 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, tornando bastante simples as demonstrações em salas de aula.

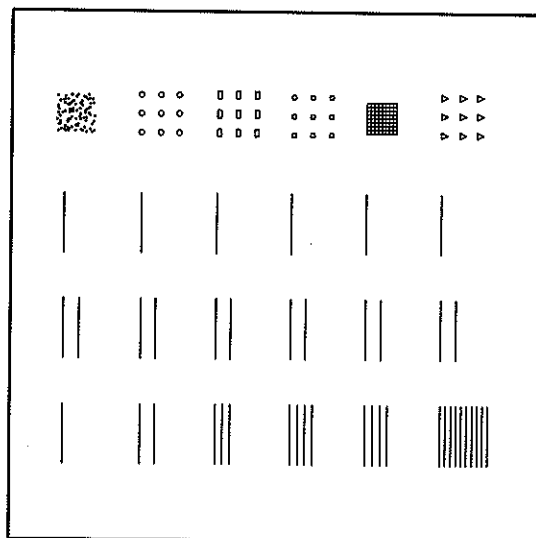


Figura 1: *Representação esquemática dos elementos difrativos gravados em cada slide.*

As fendas para experiências didáticas podem ser construídas de várias maneiras. Uma técnica rudimentar consiste em “riscar” a pintura ou fuligem de uma placa de vidro, como descrito em [1], por exemplo. Uma técnica mais elaborada consiste em fotografar desenhos ampliados das fendas. Fendas de boa qualidade podem ser obtidas por meio de técnicas mais elaboradas para geração de figuras e obtenção de fotografias, como descrito em [2], por exemplo. As fendas atualmente utilizados 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 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 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.

Uma outra técnica, que é a utilizada neste trabalho, é a gravação de uma placa de vidro revestida com metal por meio de varredura de feixe de elétrons, conforme técnicas padrões utilizadas em microeletrônica. A partir de uma placa matriz podem ser geradas cópias por contacto. As placas obtidas têm uma variedade bem maior de figuras que as fendas comerciais, podem ser fabricadas no CTI com custo menor e com uma previsão de durabilidade maior. Além disso, a matriz gravada, da qual podem ser obtidas as cópias, tem 8 conjuntos completos de figuras (slides) com diferentes dimensões para os elementos difrativos.

## 2 Descrição das placas

A Figura 1 mostra as fendas e orifícios escolhidos para serem gravados em cada slide. Depois de cortado, cada slide de vidro tem  $34,5 \times 34,5 \text{ mm}^2$ , aproximadamente. Os elementos difrativos de um dos slides são descritos na Tabela 1, onde  $M_{ij}$  indica a posição do elemento na Figura 1. Por exemplo,  $M_{12}$  indica 9 orifícios circulares posicionados na 1ª linha e 2ª coluna. A Figura 1 é esquemática e as posições dos elementos difrativos são corretas apenas aproximadamente, enquanto que as dimensões das fendas, orifícios e espaçamentos não estão em escala correta. As dimensões dos elementos são dadas nas Tabelas de 1 a 8, conforme numeração litografada nos slides. *Distância cc* indica distância de centro a centro.

Os elementos da 2ª linha ( $M_{2j}$ ) são fendas simples de  $4 \text{ mm}$  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 numa área quadrada 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 um 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  $15 \times 15$  orifícios quadrados regularmente espaçados.

Todas as fendas, orifícios e associações escolhidas são detalhadamente discutidas em livros de ótica tais como [4] e [5], por exemplo. Por isso, as figuras de difração resultantes não serão discutidas aqui. Apenas serão feitas algumas considerações quanto à visibilidade do espectro de difração em orifícios pequenos.

### 2.1 Difração em orifício circular

O primeiro mínimo de difração em um orifício circular de diâmetro  $d$  ocorre para ângulo  $\theta$  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  $1 \text{ mW}$  e cerca de  $1 \text{ mm}^2$ , a potência ótica transmitida pelo orifício é  $\sim 3 \times 10^{-5} \text{ mW}$ . Se a figura de difração é projetada numa tela a  $20 \text{ cm}$  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 [4]. Assim, como ordem de grandeza, a radiância média correspondente é  $R_{\lambda} \sim 8 \times 10^{-8} \text{ W/sr m}^2$

Tabela 1: Elementos difrativos do slide 1.

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 7, 13, 26, 52, 104, 208
$M_{31}$ a $M_{36}$	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
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 24 Distância cc: 96

Tabela 2: Elementos difrativos do slide 2.

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	1200 orifícios dispostos aleatoriamente em $2 \times 2 mm^2$	diâmetro: 7
$M_{12}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 10, 16, 32, 64, 128, 256
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 29 $\times$ 145, 29 $\times$ 261, 29 $\times$ 377, 40 $\times$ 160, 40 $\times$ 280, 40 $\times$ 400
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 24 Distância cc: 96

Tabela 3: Elementos difrativos do slide 3.

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	1200 orifícios dispostos aleatoriamente em $2 \times 2 mm^2$	diâmetro: 8
$M_{12}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 13, 19, 38, 76, 152, 304
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 32 $\times$ 160, 32 $\times$ 288, 32 $\times$ 416, 43 $\times$ 172, 43 $\times$ 301, 43 $\times$ 430
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 24 Distância cc: 96

Tabela 4: Elementos difrativos do slide 4.

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 8, 14, 28, 56, 112, 224
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 27 $\times$ 135, 27 $\times$ 243, 27 $\times$ 351, 38 $\times$ 152, 38 $\times$ 266, 38 $\times$ 380
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 26 Distância cc: 104



Tabela 5: Elementos difrativos do slide 5.

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	1200 orifícios dispostos aleatoriamente em $2 \times 2 mm^2$	diâmetro: 7
$M_{12}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 11, 17, 34, 68, 136, 272
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 30 $\times$ 150, 30 $\times$ 270, 30 $\times$ 390, 41 $\times$ 164, 41 $\times$ 287, 41 $\times$ 410
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 26 Distância cc: 104

Tabela 6: *Elementos difrativos do slide 6.*

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	1200 orifícios dispostos aleatoriamente em $2 \times 2 mm^2$	diâmetro: 8
$M_{12}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 14, 20, 40, 80, 160, 320
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 33 $\times$ 165, 33 $\times$ 297, 33 $\times$ 429, 44 $\times$ 176, 44 $\times$ 308, 44 $\times$ 440
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 26 Distância cc: 104

Tabela 7: *Elementos difrativos do slide 7.*

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 9, 15, 30, 60, 120, 240
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 28 $\times$ 140, 28 $\times$ 252, 28 $\times$ 364, 39 $\times$ 156, 39 $\times$ 273, 39 $\times$ 390
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 28 Distância cc: 112

Tabela 8: *Elementos difrativos do slide 8.*

Posição	Descrição	Dimensões em $\mu m$
$M_{11}$	1200 orifícios dispostos aleatoriamente em $2 \times 2 mm^2$	diâmetro: 7
$M_{12}$	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 de 225 orifícios quadrados	70 $\times$ 70 distância cc: 105
$M_{16}$	9 orifícios triangulares (triângulos equiláteros)	Raios: 10, 20, 40, 60, 80 100, 125, 150, 200
$M_{21}$ a $M_{26}$	Fendas simples de 4 mm de altura	larguras: 12, 18, 36, 72, 144, 288
$M_{31}$ a $M_{36}$	Fendas duplas de 4 mm de altura	largura $\times$ distância cc: 31 $\times$ 155, 31 $\times$ 279, 31 $\times$ 403, 42 $\times$ 168, 42 $\times$ 294, 42 $\times$ 420
$M_{41}$ a $M_{46}$	Fendas múltiplas (1, 2, 3, 4, 5 e 10 fendas)	Largura: 28 Distância cc: 112

Tabela 9: Regimes de adaptação do olho humano.

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

A eficiência luminosa do olho humano para a luz do laser de He-Ne é  $k_\lambda = 0,24$  ([6], por exemplo) e a luminância da tela para o primeiro anel deve ser 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 9 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). 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.

Assim, o primeiro anel de difração para orifício de  $6 \mu\text{m}$  só é visível em condições escotópicas. Portanto, pode-se dizer que o primeiro anel de difração não é visível em condições normais, numa sala escura comum. Eventualmente, poderia se tornar visível em uma experiência feita com cuidados excepcionais para adaptação do olho para condições escotópicas e vedação da luz externa e do próprio feixe de laser.

Um recurso para observar 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  $\text{mm}^2$ , 1200 orifícios foram dispostos aleatoriamente num quadrado de  $4 \text{ mm}^2$ . Deve ser observado que o laser foi admitido como tendo  $1 \text{ mm}^2$ . 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  $8 \mu\text{m}$ . Conforme mostrado, mesmo para 300 orifícios por  $\text{mm}^2$ , o espectro de difração só é visível em ambiente escuro.

## 2.2 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 puntual de Poisson ( Poisson point process, [7]). Um programa computacional [8] permitiu simular um processo puntual 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.

## 3 Fabricação das placas e suportes

Uma placa matriz com 8 slides semelhantes à da Figura 1 foi gravada por meio de varredura por feixe de elétrons. Desta matriz podem ser obtidas cópias por método de contacto ótico. A seguir, são descritas bastante resumidamente as etapas de fabricação dos slides.

Para elaboração da placa matriz [9,10], utiliza-se uma placa de vidro de baixa expansão, 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 (electron 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 ótico de contacto [11,10]. A placa no qual os padrões são copiados é uma 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. Cada cópia é cortada com uma serra especial para microeletrônica, obtendo-se os 8 slides.

A acurácia do processo é da ordem de  $1\ \mu m$ . Assim, os valores de projeto apresentados nas Tabelas de 1 a 8 devem ser entendidos como tendo incertezas dessa ordem de grandeza.

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 foi construído para movimento vertical da placa. Este suporte é fixado magneticamente num trasladador comercial simples (Optron, Campinas, SP), para movimento horizontal. Cada slide é montado numa lâmina de acrílico, que por sua vez é fixada magneticamente no suporte mecânico. Isto permite armazenar separadamente os suportes e os slides.

## 4 Conclusões

A qualidade dos espectros de difração obtida 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. Além disso, podem ser visualizados 44 espectros diferentes em cada slide, com a vantagem adicional de ser ter 8 slides com dimensões diferentes 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. Isto prejudica um pouco a observação de franjas de interferência, apenas nos poucos casos de franjas muito estreitas e próximas do máximo central.

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. Por isso, 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 é bem menor, mesmo se for incluído o custo de fabricação da placa matriz. Com a placa matriz disponível, as cópias podem ser fabricadas a um custo bem menor ainda.

A placa matriz está disponível no 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 \$10 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 da Fundação Centro Tecnológico para Informática (CTI).*

*Agradecimentos a Manoel Moura da Silva e Claudio H. Furukawa, Técnicos do IFUSP, pela ajuda na 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. E. Hecht and A. Zajac, *Optics*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company (1987).
5. R. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley, New York (1990).
6. B. Bahadur, *Display Parameters and Requirements*, in *Liquid Crystals, Applications and Uses, Vol.2*, B. Bahadur (Editor), World Scientific, (1993).
7. D. H. Stoyan, *Fractals, Random Shapes and Point Fields, Methods of Geometrical Statistics*, John Wiley and Sons (1994).
8. M. R. S. Pereira, *Processos de Poisson duplamente estocásticos na caracterização de reservatórios fraturados*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas, Campinas (1998).
9. *Fabricação por Feixe de Elétrons de Máscaras e Retículos - Processo 1EB/Versão 1.02*, Relatório Interno IM/LL, Fundação Centro Tecnológico para Informática, Campinas (1995).
10. V. P. Mammana, *Membranas Porosas Auto-Sustentadas de Diamante*, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo (1996).
11. *Fabricação Óptica de Máscaras e Retículos - Processo 1OP/Versão 1.0*, Relatório Interno IM/LL, Fundação Centro Tecnológico para Informática, Campinas (1994).