

Gravação e Caracterização de Microlentes Fabricadas Através da Técnica de Amolecimento da Fotorresina

Edson J. de Carvalho, Paulo F. Gomes, Lucila Cescato

Instituto de Física Gleb Wataghin - Campinas, SP, Brasil

carvalho@ifi.unicamp.br - www.ifi.unicamp.br/~cescato

Recebido em 7 de junho, 2002. Versão revisada recebida em 30 de outubro, 2002. Aceito para publicação em 15 de novembro de 2002.

Neste trabalho descrevemos a fabricação de microlentes através da técnica de amolecimento da fotorresina. A curvatura e abertura numérica das microlentes foram determinadas através da medida de suas alturas e diâmetros utilizando-se perfilometria, microscopia eletrônica e microscopia interferométrica. Os resultados obtidos permitiram estabelecer a faixa dos valores de abertura numérica das microlentes que podem ser fabricadas com esta técnica na fotorresina AZ-1518, que é utilizada em processos convencionais de microeletrônica.

In this work we describe the manufacture of microlenses through the technique of melting resist. The curvature and numeric aperture of the microlenses were evaluated through the measurement of their height and diameter using profilometry, electron microscopy and interferometric microscopy. The results allowed determining the interval of numeric apertures that can be realized with this technique, in the photoresist AZ-1518, used in conventional microelectronic processes.

1 Introdução

A fotogração é uma técnica amplamente empregada tanto em microeletrônica como na indústria gráfica. Um padrão existente numa máscara na forma de claros e escuros pode ser transformado num padrão em relevo utilizando-se fotorresinas que alteram sua solubilidade nas regiões expostas a luz. Recentemente, esta propriedade tem sido explorada também para a fabricação de sistemas de micromecânica e de elementos ópticos. Diversos tipos de elementos ópticos podem ser gravados através de fotogração, abrangendo desde elementos ópticos com perfil em relevo binário, tais como placas de Zonas de Fresnel ou hologramas gerados por computador, até elementos com perfil contínuo tais como microlentes e micro-prismas.

As microlentes são elementos ópticos empregados em diversos dispositivos tais como interconectores ópticos [1] e detectores de frente de onda [2,3]. Para a fabricação deste tipo de componente foi proposta recentemente uma técnica denominada "melting resist" [4,5] ou amolecimento da resina. Esta técnica consiste na fotogração de padrões de círculos sobre um filme de fotorresina positiva, que após a exposição e revelação, resultam em cilindros de fotorresina em relevo sobre o vidro. O diâmetro dos cilindros corresponde ao diâmetro dos círculos da máscara enquanto que sua altura à espessura do filme de fotorresina. Após a fotogração, o conjunto é aquecido até a temperatura de amolecimento da fotorresina e depois resfriado à temperatura ambiente. Devido à tensão superficial da fotorresina

líquida os cilindros deformam-se em calotas esféricas que se comportam como microlentes.

2 Processo de Fabricação.

A Fig. 1 ilustra o processo de fabricação das microlentes que consiste em três etapas: a deposição do filme de fotorresina de espessura apropriada sobre um substrato de vidro, a fotogração do padrão de círculos de diâmetros e espaçamentos apropriados e o posterior amolecimento térmico da fotorresina, seguido de resfriamento à temperatura ambiente.



Figura 1. Esquema da confecção de microlentes pelo processo de amolecimento da fotorresina. O aquecimento da fotorresina deforma os cilindros anteriormente gravados resultando em calotas esféricas.

II.1 Preparação dos filmes de fotorresina

As fotorresinas positivas da série AZ são amplamente utilizadas em microeletrônica por terem alta resolução espacial. Em particular a fotorresina AZ-1518 possui uma sensibilidade espectral mais larga, podendo ser exposta do U.V. próximo até a região azul do espectro visível. Os filmes desta fotorresina foram depositados sobre substratos de vidro através de centrifugação (“spinner”) com posterior “pré-bake” de 70 °C durante 20 minutos. A espessura do filme pode ser controlada pela concentração da fotorresina e pela velocidade de centrifugação. Utilizando-se a fotorresina AZ-1518 (fabricada pela Hoescht), a maior espessura que pode ser depositada sem comprometimento da homogeneidade do filme é 5 μm . Com dupla deposição conseguimos depositar filmes homogêneos com espessura de 10 μm .

II.2 Máscaras

Para a fotogração utilizamos máscaras de círculos impressos em fotolitos. Os padrões de círculos foram gerados no programa Corel Draw. A qualidade da fotogração depende fortemente da resolução da impressão e da qualidade do fotolito. A Fig.2 mostra as imagens obtidas, em um microscópio óptico, para círculos com diâmetros próximos de 100 μm de fotolitos impressos em diferentes locais. A Fig.2a mostra a micrografia de um círculo (com deformação hexagonal), de 126 μm de diâmetro impresso em fotolito na empresa gráfica Bureal, enquanto que a Fig.2b mostra o mesmo círculo para a impressão feita na gráfica Fotoliart. Na Fig.2c temos um círculo de 100 μm impresso em fotolito na empresa Cad-Service. A impressão feita na Cad-Service (Fig2c.) é visivelmente a que possui maior resolução e também melhor qualidade no fotolito.

II.3 Fotogração

Para a fotogração, o filme foi exposto por contato direto entre o fotolito e a fotorresina utilizando-se simplesmente uma lâmpada mercúrio (UV). Na configuração de colimação e expansão utilizada, a irradiância sobre as amostras é da ordem de 15 mW/cm². O tempo de exposição e conseqüentemente a energia de exposição utilizados, dependeu da espessura do filme. Assim, para um filme de 10 μm de espessura foram necessários 8 minutos de exposição. O passo seguinte consiste em revelar o filme retirando o material das regiões expostas à luz. Para isto utilizamos o revelador AZ-351, também fabricado pela Hoescht, diluído em água deionizada na razão 1:3. Nas condições descritas acima o tempo de revelação necessário é de 1min30s para o mesmo filme de 10 μm de espessura.

Após a exposição e revelação obtêm-se uma estrutura cilíndrica, onde o formato da seção reta depende da qualidade da fotogração e a altura do cilindro corresponde à espessura do filme de fotorresina. Um exemplo do perfil de uma estrutura gravada pode ser visto na Fig.3a.

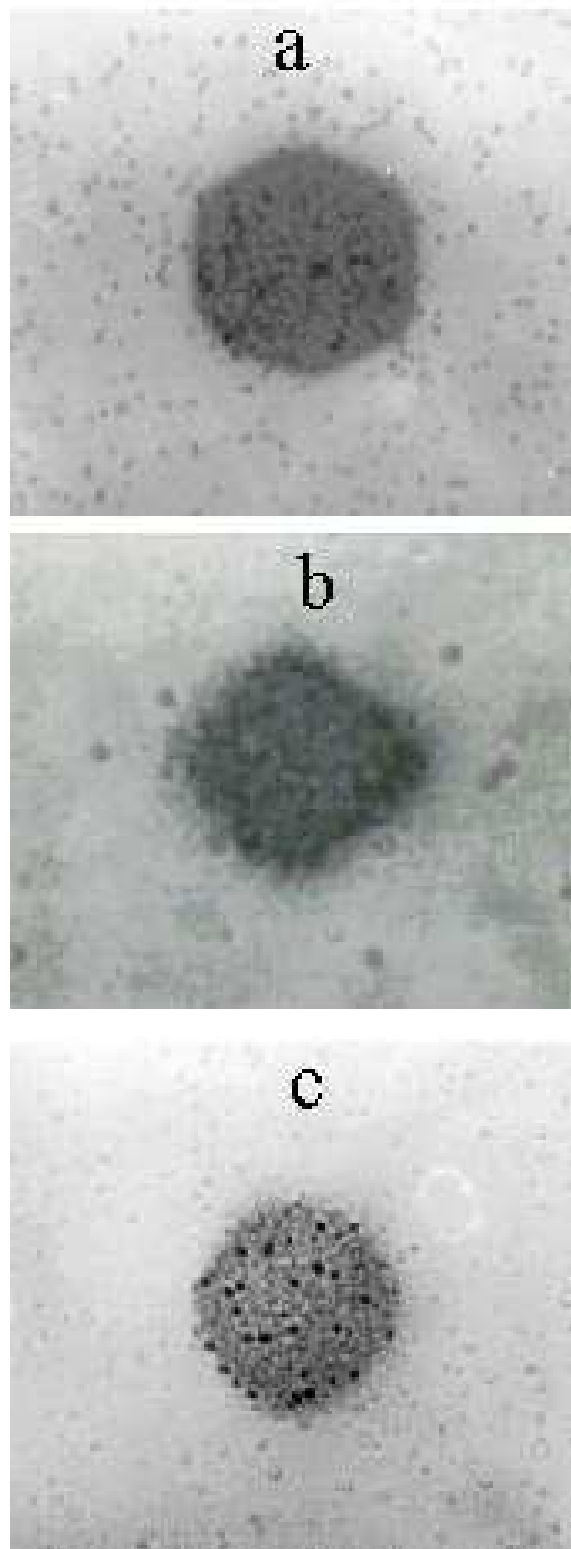


Figura 2. a) Círculo de 126 μm impresso na gráfica BUREAUL*, b) mesmo diâmetro impresso na gráfica FOTOLIART*, c). círculo com 100 μm de diâmetro impresso na Cad-Service Circuitos Impressos*. *empresas localizadas em Campinas-SP.

II.4 Amolecimento da Fotorresina

O processo consiste no aquecimento e conseqüente deformação das estruturas gravadas em relevo na fotorresina. Em nosso caso, aquecemos as amostras numa placa quente a 170 °C durante 30 minutos. Nenhuma diferença significativa na deformação das estruturas pode ser notada para uma faixa de temperatura entre 130 e 170 °C. A deformação dos cilindros em calotas esféricas é exemplificada na perfilometria mostrada na Fig. 3, antes (Fig. 3a) e após (Fig. 3b) o aquecimento.

A Fig. 4 mostra imagens obtidas via microscopia eletrônica, de diferentes microlentes. Neste caso as microlentes foram confeccionadas a partir de máscaras com círculos de diâmetros, respectivamente, de 50, 100 e 200 μm, e filmes de fotorresina com 10 μm de espessura.

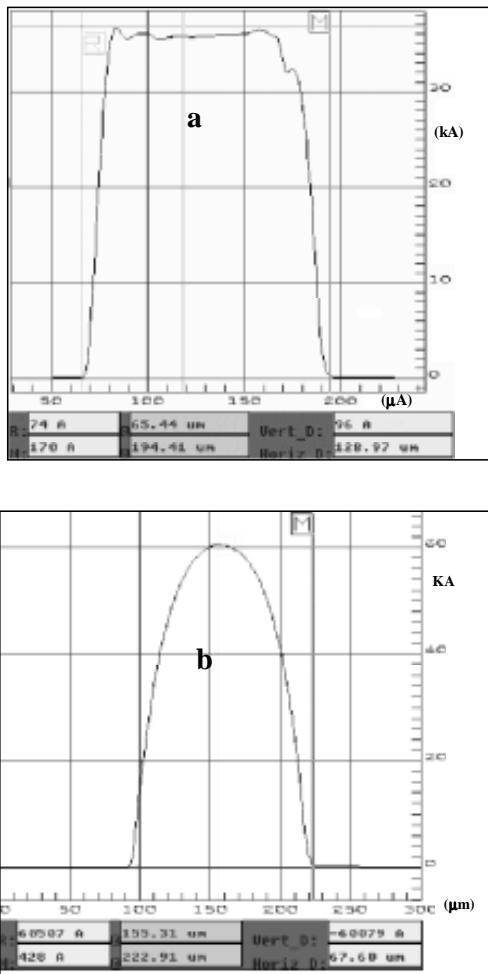


Figura 3. Medidas perfilométricas mostrando o processo de deformação da estrutura cilíndrica em uma calota esférica. a) antes do aquecimento e b) após o aquecimento.

3 Caracterização das microlentes

Uma vez obtidas as microlentes, é necessário caracteriza-las quanto a sua esfericidade, altura, raio de curvatura, distância

focal e abertura numérica. A abertura numérica NA de uma lente é definida como:

$$N.A. = \text{sen}(\alpha) \quad (1)$$

com α sendo o ângulo formado entre o eixo óptico e o raio refratado pela lente que incide na borda da lente na direção paralela ao eixo óptico, conforme esquematizado na Fig.5.

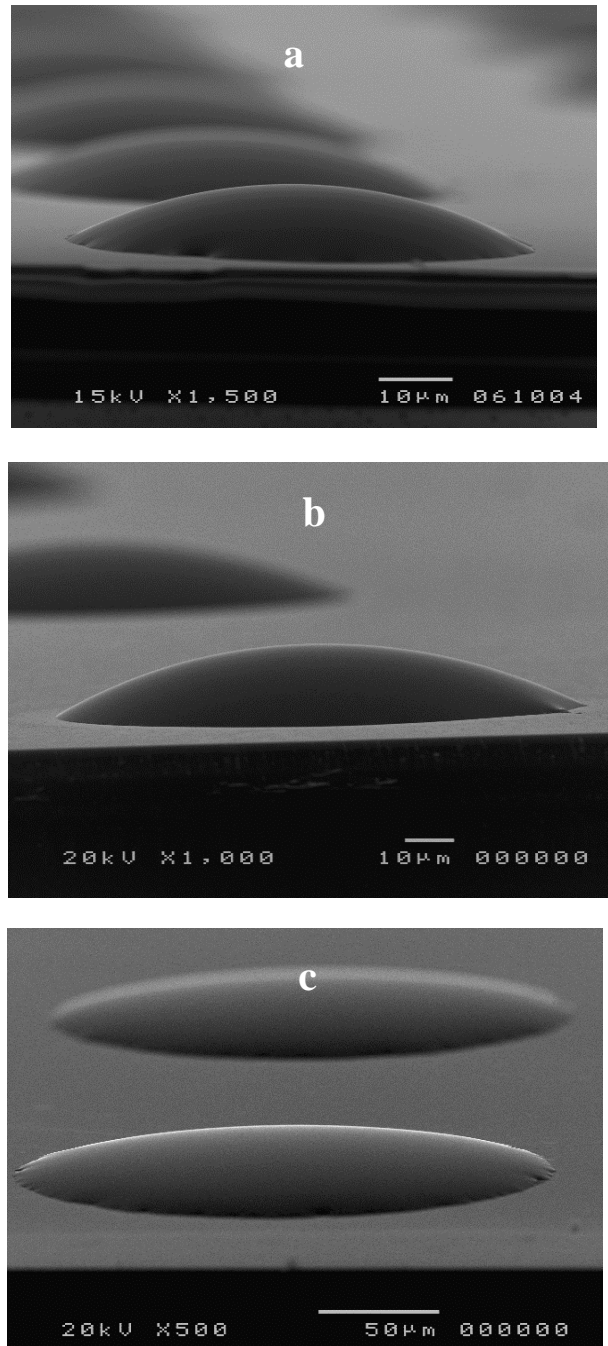


Figura 4. Microlentes obtidas através da técnica de melting-resist. A) gravadas a partir de máscara de círculos de diâmetro 50 μm. B) a partir de círculos com 100 μm de diâmetro. C) a partir de círculos com diâmetro de 200 μm. Em todos os casos a espessura do filme de fotorresina utilizado foi de aproximadamente 10 μm.

Segundo a literatura [2,4], o método de “melting resist” se limita a fabricação de microlentes com altos valores de aberturas numéricas NA. Em geral, as menores aberturas numéricas que se consegue são da ordem de 0,1 [4]. As limitações do método foram estudadas através da confecção de microlentes com máscaras de diferentes diâmetros em filmes de diferentes espessuras.

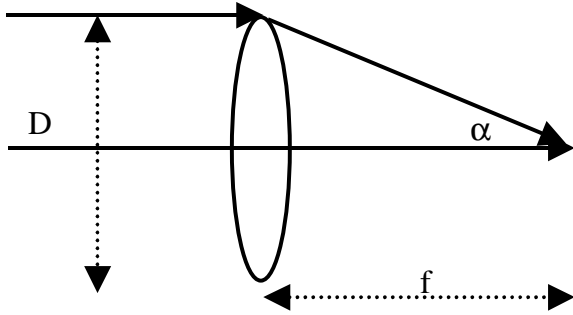


Figura 5. Esquema ilustrando o ângulo que define a abertura numérica de uma lente.

A esfericidade das microlentes pode ser avaliada através de um microscópio interferométrico. Este microscópio é basicamente um interferômetro de Michelson onde a amostra é colocada na posição de um dos espelhos. Se a estrutura gravada tiver um perfil circular, os pontos equidistantes do topo da estrutura corresponderam a uma mesma diferença de caminho óptico percorrido pela luz. Assim, observa-se a formação de anéis concêntricos (anéis de Newton). A Fig. 6 mostra os interferogramas obtidos para duas microlentes diferentes. A microlente mostrada na Fig. 6a foi gravada com uma máscara de círculos com $200\mu\text{m}$ de diâmetro sobre um filme de $10\mu\text{m}$ de espessura. A microlente mostrada na Fig. 6b foi gravada com uma máscara de círculos com $177\mu\text{m}$ de diâmetro num filme com $3,5\mu\text{m}$ de espessura. Note que neste último caso não observamos a formação dos anéis concêntricos sobre a estrutura, demonstrando que a estrutura resultante não é uma calota esférica.

Estes interferogramas também podem ser utilizados para estimarmos a distância focal das microlentes. Como a separação entre duas franjas circulares consecutivas corresponde a um desnível de altura de $\lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda da luz do microscópio, num dado diâmetro d em que podem se contar N franjas (Fig. 7), a altura h da estrutura correspondente a este diâmetro d é determinada diretamente por $h = N\lambda/2$. Assim, através de geometria (Fig. 7) podemos determinar o raio R da esfera que contém a calota esférica:

$$R = \frac{1}{2h} \left[h^2 + \frac{d^2}{4} \right] \quad (2)$$

A partir do raio calculado pela Eq.2 e considerando a microlente como uma lente plano-convexa podemos determinar a sua distância focal pela equação:

$$f = \frac{R}{n-1} \quad (3)$$

onde consideramos $n = 1,6$ para o índice de refração médio da fotorresina na região do visível e IV próximo. Medindo-se D , utilizando-se a Eq.1 e a geometria da Fig. 5 pode-se calcular a NA. das microlentes como:

$$NA = \text{sen} \left[\arctan \left(\frac{D}{2f} \right) \right] \quad (4)$$

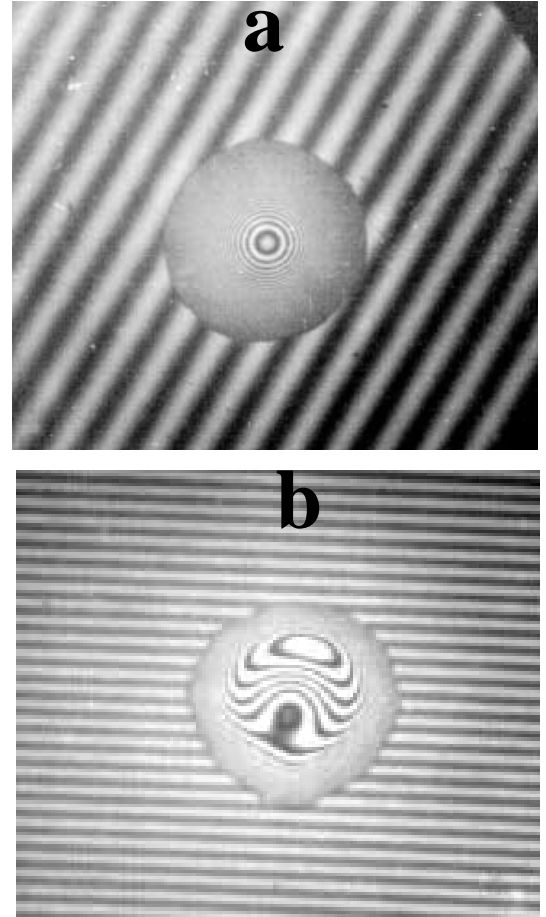


Figura 6. Interferogramas obtidos no microscópio interferométrico. a) Microlente com abertura numérica $NA=0,12$; a formação de anéis concêntricos indica a esfericidade da microlente b) Microlente com $NA=0,06$, observa-se que neste caso não se formam anéis concêntricos.

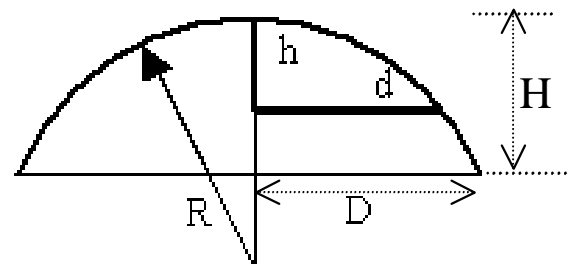


Figura 7. Esquema da geometria utilizada na estimativa, através dos interferogramas, do raio de curvatura e da distância focal das microlentes.

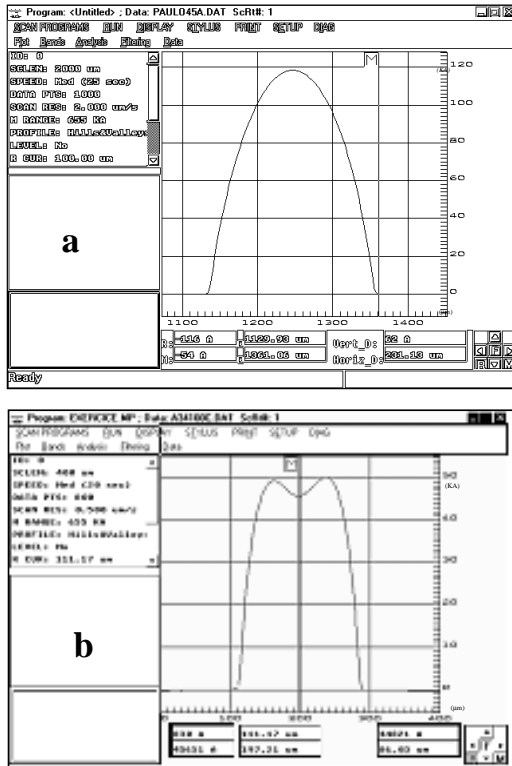


Figura 8. Gráficos obtidos com o perfilômetro DEKTAC 3. a) perfil mensurado da microlente correspondente a Fig.6a; b) perfil correspondente a microlente mostrada na Fig. 6b.

Por exemplo, para uma microlente gravada com uma máscara de círculos de diâmetro $200\mu\text{m}$ exposta sobre um filme de $10\mu\text{m}$ de espessura foram medidos no microscópio interferométrico: $h = 2,12\mu\text{m}$, $d = 90\mu\text{m}$ e $D=220\mu\text{m}$ resultando em $R = 500\mu\text{m}$ (Eq.2), $f=800\mu\text{m}$ (Eq.3) e $NA.=0,14$ (Eq.4).

Uma análise quantitativa e mais detalhada das estruturas gravadas pode ser feita através de medidas com um perfilômetro. Neste tipo de equipamento, uma agulha mede o perfil da seção transversal da micro-lente fornecendo um gráfico que contém informações como a esfericidade, altura H e o diâmetro D da micro-lente. Um exemplo das medidas realizadas com o perfilômetro é mostrado na Fig. 8. Os perfis obtidos são correspondentes às microlentes cujas microscopias interferométricas estão mostradas nas figuras 6a e 6b. Na Fig.8b notamos o afundamento no topo da estrutura o que provoca a distorção dos anéis no interferograma mostrado na Fig.6b. Esta estrutura corresponderia a uma mi-

cro-lente com abertura numérica de aproximadamente 0,06, o que confirma a limitação da técnica de amolecimento da fotorresina para aberturas numéricas menores que 0,1 [4].

Os parâmetros geométricos H e D (Fig. 7), medidos com o perfilômetro podem ser utilizados diretamente na mesma Eq.2 (substituindo h e d respectivamente) para se obter o raio de curvatura R. Estes raios utilizados nas Eq.3 e Eq.4 permitem o cálculo direto das aberturas numéricas NA. Além dos perfis mostrados na Fig. 8 o perfilômetro também fornece uma seqüência de pontos correspondentes às coordenadas da agulha em cada passo da sua trajetória. Com isto, podemos realizar uma análise quantitativa do perfil da superfície através de um ajuste dos pontos à equação de um arco de circunferência. A Fig. 9 mostra um exemplo destes ajustes onde χ^2 corresponde à variância deste ajuste.

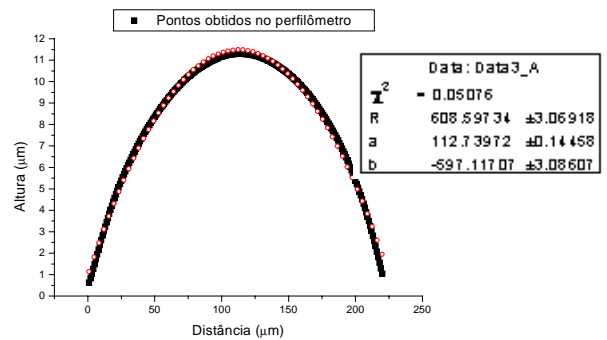


Figura 9. Ajuste dos pontos gerados pelo perfilômetro para uma microlente. As curvas são ajustadas pela equação de uma semi-circunferência através do programa Origin.

A Tabela 1 mostra os parâmetros geométricos H e D, medidos diretamente no perfilômetro, assim como seus correspondentes parâmetros ópticos: raio de curvatura, distância focal e abertura numérica, para um conjunto de diferentes microlentes. A Tabela 2 mostra os parâmetros ópticos obtidos a partir do ajuste das coordenadas da agulha (Fig. 9), para este mesmo conjunto de microlentes. Note que, na Tabela 2 observa-se uma relação inversamente proporcional entre a variância (χ^2) e NA. Para a microlente com $NA=0,11$ temos o maior valor da variância, correspondendo ao maior afastamento do perfil esférico. Note também que, a discrepância entre o valor do raio de curvatura R calculado através da medida direta da altura H (Tab. 1) e o valor de R calculado pelo ajuste dos pontos (Tab. 2) é maior quanto menor a abertura numérica da microlente.

Tabela 1: Parâmetros geométricos medidos com o perfilômetro para diferentes microlentes e seus correspondentes raios de curvatura, focos e aberturas numéricas.

Máscara (μm)	Espessura do Filme (μm)	D (μm)	H (μm)	R (μm)	f (μm)	NA
50	5	65	6,8	80	133	0,24
100	10	125	11,2	180	300	0,21
177	3.5	185	5			0.06
200	10	220	11,8	520	900	0,12

Tabela 2: Valores característicos de diferentes microlentes (Fig. 4) gravadas com as diferentes máscaras. Estes valores são obtidos via regressão não-linear dos pontos gerados pelo perfilômetro.

Máscara (μm)	R (μm)	χ^2 (μm) ²	f (μm)	NA
50	79,1	0,0029	131,8	0,24
100	187,8	0,0030	313,0	0,20
200	608	0.0508	1013	0,11

Além deste conjunto de amostras, cujas características estão mostradas nas Tabelas 1 e 2, diversos outros conjuntos de microlentes foram confeccionados, utilizando-se as mesmas máscaras e condições, porém em dias e processos diferentes. As medidas dos parâmetros ópticos destas amostras (via perfilômetro) confirmaram a repetibilidade do processo de amolecimento da fotorresina. Para as microlentes de maiores aberturas numéricas ($> 0,2$), obtivemos uma variação máxima de 8% nos valores de N.A., enquanto que para as menores aberturas numéricas esta variação foi menor que 3%. Esta discrepância se deve provavelmente ao processo de fotogração, que no nosso caso tem baixa resolução. Utilizando-se nosso sistema de exposição e máscaras de fotolito, as menores dimensões de círculos que podem ser gravados são de $50\mu\text{m}$, resultando em aberturas numéricas na faixa de 0,4 para um filme de $10\mu\text{m}$ (Fig. 4a). Microlentes de menores dimensões e maiores aberturas numéricas podem ser obtidas utilizando-se uma fotoalinhadora e uma máscara de maior resolução (apropriada para microeletrônica).

4 Conclusões

Implementamos um processo de confecção de microlentes, utilizando a fotorresina AZ-1518 depositada sobre substratos de vidro, que permite a confecção de microlentes com abertura numérica (NA.) na faixa entre $0,1 < \text{N.A.} < 0,4$. O limite para baixas NA. é determinado pela viscosidade da fotorresina e pela tensão superficial nas interfaces ar – fotorresina – substrato. O valor limite de 0,1 foi verificado experimentalmente, estando de acordo com os valores descritos na literatura [2,4,6]. Além disso, a caracterização quantitativa, feita através da perfilometria e da variância no ajuste dos dados do perfilômetro, permitiu-nos observar já um pequeno afastamento da curvatura esférica para valores de N.A. ligeiramente maiores que 0,1.

O limite superior para a abertura numérica das micro-

lentes é definido por dois fatores: a máxima espessura dos filmes de fotorresina e a resolução do processo de fotogração. No nosso caso, a espessura máxima que pode ser obtida com a fotorresina AZ-1518 é $10\mu\text{m}$ e os menores círculos de boa qualidade obtidos com fotolitos são da ordem de $50\mu\text{m}$, resultando numa NA = 0,4.

Embora a faixa de aberturas numéricas $0,1 < \text{N.A.} < 0,4$ pareça estreita, ela abrange grande parte das aplicações de arranjos de microlentes, tais como o detector de Shack-Hartmann [2,3].

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio financeiro, ao professor Mario Bica e aos estudantes Elso Rigon e Cristiano Cordeiro pelas medidas no perfilômetro.

Referências

- [1] T. Mancebo and S. Bará, “Interferometric monitoring of surface shaping processes in microlenses produced by melting photoresist”, *Journal of Modern Optics*, vol. 45, no. 5, 1029-1037 (1998).
- [2] Ph. Nussbaum, F. Gonté, C. Boillat, H. P. Herzig, “Low NA fused silica refractive microlenses for Shack-Hartmann wave front sensor”, *Diffractive Optics and Micro-Optics*, Québec, June 18-22 (2000), 247-249.
- [3] M. C. Hutley, “Microlens Arrays”, *Phys. Educ.* Vol. 29, 160-164 (1994).
- [4] D. Daly, R. F. Stevens, M.C. Hutley and N. Davies, “The manufacture of microlenses by melting photoresist”, *J. Meas. Sci. Tech.* 1, 759-766 (1990).
- [5] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, G. A. N. Connell, “Technique for monolithic fabrication of microlens arrays”, *Appl. Opt.* Vol. 27, No. 7, 1281-1284 (1988).
- [6] S. Haselbeck, H. Schreiber, J. Schwinder, N. Streibl, “Microlenses fabricated by melting a photoresist on a base layer”, *Optical Engineering*, Vol. 32, No. 6, 1322-1324 (1993).