

Usinagem de microcanais com laser de femtossegundos para uso em microfluídica

Machado, Leandro Matioli; Samad, Ricardo Elgul; de Freitas, Anderson Zanardi; Vidal, José Tort; Vieira, Nilson Dias; Nogueira, Gessé Eduardo Calvo Nogueira; de Rossi, Wagner

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Centro de Lasers e Aplicações, IPEN/CENENSP, Av Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo, Brasil

Resumo: *O estudo da microfluídica tem possibilitado o desenvolvimento de dispositivos integrados incorporando microcanais, componentes eletrônicos, ópticos e mecânicos tipo Lab-on-a-Chip. Esta evolução foi amplamente impulsionada pela introdução de novas tecnologias de microfabricação, tais como a microusinagem a laser e a microlitografia. Em particular, a utilização de lasers de femtossegundo neste tipo de usinagem tem se mostrado muito promissora, principalmente pela sua alta precisão e independência do tipo de material usado.*

Neste trabalho foi desenvolvida uma técnica para produção deste tipo de microcanal em vidro óptico BK7 com a utilização de laser de pulso ultracurto, com 55 fs de largura temporal.

O objetivo foi o de obter parâmetros fundamentais de processo que levassem a um controle dimensional preciso do canal usinado, resultando em uma boa qualidade da borda, alto grau de perpendicularismo das paredes e um fundo plano. Estes parâmetros foram obtidos em função da intensidade, fluência, sobreposição de pulsos e efeitos de incubação. O parâmetro de incubação, bem como o volume extraído por pulso, foram obtidos através da medida da fluência de limiar em função do número de pulsos sobrepostos.

Os ensaios realizados foram analisados em MEV, microscopia óptica e rugosímetro mecânico e óptico. A sensibilidade do processo permite a retirada controlada de material em volumes extremamente pequenos, através da focalização do feixe laser em diâmetros de poucos micra, com possibilidade de interação em profundidade de poucas centenas de nanômetros. Desta maneira, foi possível a obtenção de canais com largura desde 5 microns e profundidades desde poucas centenas de nanômetros. Para uso em microfluídica, contudo, os microcanais devem ser maiores, e para esta aplicação foram produzidos canais com dimensões de 100 x 100 micra; e um dispositivo para microfluídica foi fabricado e é mostrado no trabalho.

Palavras-chave: *laser de femtossegundo, microusinagem, microcanais, vidros ópticos.*

1. INTRODUÇÃO

A manipulação precisa e controlada de pequenas quantidades de fluídos torna necessário a produção de montagens químicas e biológicas com dimensões cada vez menores. Conjuntos chamados de microfluídicos com dimensões micrométricas têm sido produzidos já em escala comercial para atender a esta necessidade. Normalmente são bidimensionais e produzidos na superfície de materiais transparentes, mas podem ser tridimensionais e produzidos em qualquer tipo de material (Krishna Chaitanya Vishnubhatla 2009). A estrutura básica mais utilizada é um canal com dimensões diminutas chamados de microcanais. Geralmente sua seção transversal é quadrada, com dezenas a poucas centenas de micra, e comprimentos que podem chegar a alguns centímetros. As aplicações vão desde analisadores de DNA (Burns, Johnson et al. 1998) até reatores químicos microscópicos (Tripathi). O método mais utilizado para confecção destes microcanais é o de litografia, onde um ataque químico combinado com uma sensibilização óptica é capaz de produzir uma estrutura diminuta com grande precisão e ótimo acabamento superficial. Este método, contudo é muito trabalhoso, tornando caro e demorado o processo de fabricação. A diminuição do custo e aumento da produtividade só é obtida quando da produção em massa de uma peça vinda da mesma máscara matriz.

Uma alternativa muito interessante para a produção destes microcanais é a usinagem com pulsos laser ultracurtos (Aguilar, Lu et al. 2005; Sugioka, Hanada et al. 2007). Com este método, o desenho da estrutura pode ser facilmente modificado para cada peça individual sem aumento de custo ou tempo de processo. Praticamente não há restrição para o tipo de material, as dimensões podem ser controladas com precisão, e a razão de aspecto (largura / profundidade) pode ser de até algumas dezenas, o que é extremamente difícil com o método litográfico.

Por ser um método relativamente recente e extremamente complexo, a física da interação de pulsos laser ultracurtos, com a matéria ainda é objeto de intensos estudos. Embora ainda não sendo um processo totalmente dominado, a usinagem com este tipo de pulsos tem sido utilizada para a produção de estruturas micrométricas em

diversos tipos de materiais. Não existe uma metodologia e uma carta de processos estabelecida para a remoção de material, o que existe são modelos de interação para pulsos únicos, o que obviamente precisa ser corrigido quando da usinagem de cavidades que necessitam de uma sobreposição grande de pulsos laser. Neste contexto, este trabalho buscou obter uma relação entre a remoção de material e o número de pulsos laser sobrepostos em um mesmo ponto. Isto possibilitou a usinagem de microcanais com dimensões controladas e grandes profundidades mesmo sem a ocorrência de uma zona afetada termicamente.

1.1. Absorção da radiação

A interação entre os elétrons de condução e a rede cristalina ocorre pelo acoplamento elétron-fônon, apresenta um tempo característico da ordem de picossegundo, e é responsável pelo transporte de energia destes elétrons para a rede. Quando pulsos laser ultracurtos, de poucas dezenas ou centenas de femtossegundos ($fs = 10^{-15}s$), são focalizados sobre uma superfície metálica, praticamente toda a energia absorvida pelos elétrons livres é levada juntamente com o material ejetado sem que haja tempo de ser transferida para a rede do material remanescente. Isto também pode ocorrer para dielétricos e semicondutores, inclusive para materiais transparentes ao comprimento de onda do laser utilizado. Nestes casos, a intensidade extremamente elevada de fótons torna altamente provável a absorção multifotônica. O número necessário de fótons é simultaneamente absorvido pelos elétrons mais externos da banda de valência que são então levados à banda de condução. Esses elétrons, chamados elétrons “sementes”, podem agora absorver fótons únicos e passar para um nível mais alto de energia dentro da própria banda de condução. Nesta condição, é alta a probabilidade destes elétrons chocarem-se com elétrons ligados e voltarem ao nível fundamental da banda de condução. Neste processo, o elétron da banda de valência é levado para a banda de condução, aumentando assim o número de elétrons livres, no que é chamado de efeito “avalanche”. Neste ponto, onde o feixe laser foi focalizado, ocorre então a “metalização” do dielétrico, que se torna um material altamente absorvedor (Jones, Braunlich et al. 1989; Perry, Stuart et al. 1999; Bloembergen Mar 1974).

A alta taxa de geração de elétrons livres por absorção multifotônica permite a criação de um grande número de elétrons “sementes”, isso garante um processo de ablação determinístico com um limiar de dano e regiões ablacionadas bem definidas. Isso não ocorre com pulsos mais longos que alguns ps, pois não geram intensidades suficientes para criar muitos elétrons “sementes” por absorção multifotônica. Nesses pulsos longos, o processo avalanche tem maior peso na geração dos elétrons livres responsáveis pela ablação, e nesse caso, os elétrons sementes dependem de elétrons na banda de condução, gerados por defeitos ou excitados termicamente, tornando assim o processo de ablação estocástico. Além disso, pulsos longos também se caracterizam por uma zona afetada pelo calor significativamente maior.

1.2. Processo de Ablação - Alta e Baixa Fluência

Durante o processo de absorção de radiação laser ultraintensa, um grande número de elétrons é ejetado do material por efeito fotoelétrico. Os íons positivos remanescentes sofrem então uma repulsão Coulombiana muito intensa que também os ejeta para fora da superfície do material. Este processo, chamado de “ablação de baixa fluência”, é caracterizado por uma taxa de remoção de material muito baixa (nanômetros de profundidade por pulso) e pela total ausência de uma zona afetada pelo calor (Stoian, Rosenfeld et al. 2002).

Por ser um processo probabilístico, a interação elétron-fônon pode transferir uma pequena quantidade de calor para a rede mesmo para tempos de interação muito curtos. Se a densidade destes elétrons não for muito grande, este calor é rapidamente dissipado não representando aumento significativo de temperatura local. Para o caso de alta fluência, contudo, onde a densidade de elétrons livres formada é extremamente alta, o somatório destas pequenas quantidades de calor, pode levar a um aumento local de temperatura extremamente alto. Obviamente que isto depende da relação entre os parâmetros de processo do laser e das características térmicas do material. Para fluências altas o suficiente, os gradientes temporais e espaciais de temperatura são tão elevados que a rede cristalina chega até a temperatura crítica, sofrendo então uma explosão de fase (Efimov, Juodkakis et al. 2004), onde o material passa diretamente do estado sólido para o estado gasoso. Nesse caso, chamado de ablação por alta fluência, o processo é predominantemente térmico, caracterizado por altas taxas de remoção de material e por uma pequena zona afetada pelo calor.

Definem-se então duas regiões de intensidade onde podem ou não ocorrer o efeito térmico na ablação. Estas são conhecidas como as regiões de baixa e de alta fluência, onde efeitos térmicos não estão presentes somente no primeiro caso.

A determinação da fluência para o limiar de ablação F_{th} é obtida através da relação entre a fluência $F_0^{média}$ do pulso laser e o diâmetro D do dano provocado por este. A equação que relaciona estes parâmetros é dada por (P.T. Mannion 2005):

$$F_0^{média} = F_{th} \exp\left(\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

onde,

$$F_0^{média} = \frac{E_{pulso}}{\pi\omega_0^2} \quad (2)$$

E_{pulso} é a energia do pulso laser e ω_0 é o raio do feixe laser na superfície da amostra.

1.3. Efeito da sobreposição de pulsos

A irradiação com pulsos curtos, com fluência abaixo do limiar de ablação do material, não é suficiente para causar qualquer alteração macroscópica como a ejeção de material ou dano catastrófico. A irradiação repetida, contudo, destas irradiações, pode levar a dano no material ou iniciar o processo de ablação. Isto ocorre porque irradiações precedentes causam um “pré-dano” no material, alterando de alguma maneira a rede cristalina criando níveis energéticos interbandas e tornando mais provável a absorção multifotônica. Estes pré-danos, não são observáveis diretamente, e entre outros podem ser vacâncias, centros de cor ou éxcitons auto-aprisionados (Itina and Shcheblanov).

A (3) foi desenvolvida por (Ashkenasi, Rosenfeld et al. 2002) e descreve o comportamento do limiar de dano em função do número de pulsos para um mesmo comprimento de onda.

$$F_{th}(N) = F_{th}(\infty) + [F_{th}(1) - F_{th}(\infty)]e^{-k(N-1)} \quad (3)$$

Aqui, $F_{th}(N)$ o limiar de dano para N pulsos, $F_{th}(1)$ e $F_{th}(\infty)$ são o limiar de dano para um e infinitos pulsos respectivamente. O parâmetro k , chamado de “parâmetro de incubação” pode então ser encontrado através do ajuste da curva da (3).

Para o caso de usinagem de uma cavidade, onde a sobreposição de muitos pulsos é utilizada, o conhecimento deste parâmetro de incubação é de fundamental importância. Se ele não for levado em conta, pode ser possível a transição entre a região de baixa para a de alta fluência, mesmo sem a alteração dos parâmetros de processo. Pode-se partir de uma condição de baixa fluência e terminar em uma onde material fundido e zona afetada pelo calor podem ocorrer.

Com objetivo de produzir microcanais em vidro óptico BK7, foram feitas medidas de limiar de dano para pulsos únicos e para pulsos sobrepostos, bem como do parâmetro de incubação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho utilizou um feixe laser vindo do sistema T³ (table top terawatt laser) do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN. O sistema laser emite radiação com largura espectral de 40 nm centrada em 800 nm, com largura temporal de 55 fs taxa de repetição de até 4.000 Hz e energia por pulso de até 800 μ J. Todos estes parâmetros podem ser variados e controlados com a utilização de dispositivos adequados. O sistema também possui equipamentos e dispositivos que podem monitorar e controlar diversos aspectos do feixe a ser focalizado na amostra de interesse. Uma mesa de coordenadas com movimentos em dois eixos com precisão micrométrica e programação CNC foram usados para guiar o feixe pela amostra. O feixe de 6 mm de diâmetro foi focalizado na superfície da amostra com uma lente de 38 mm de comprimento focal Fig. (1).

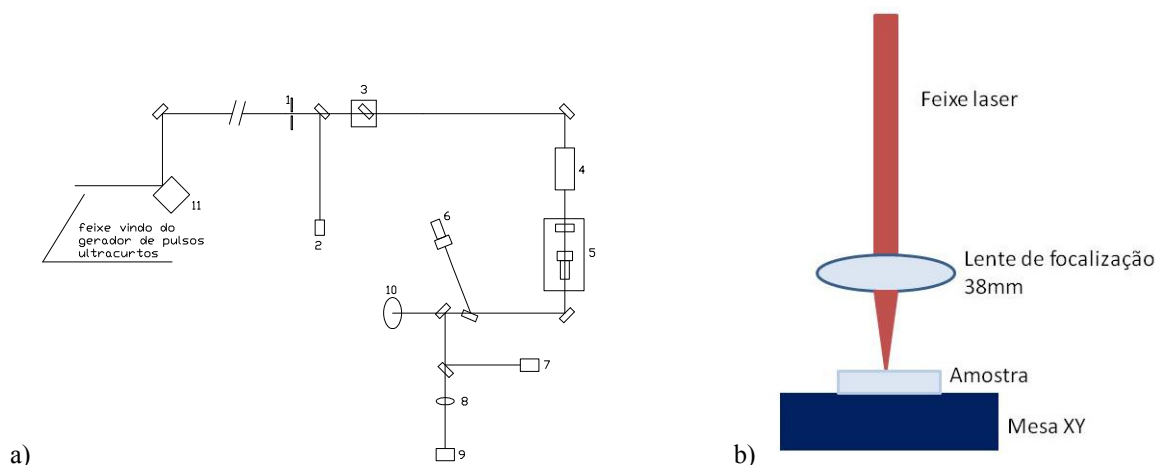


Figura 1. a) 1 – íris diam. 12mm; 2 – detector de quadrante para controle de vibração do feixe; 3 – Shutter pneumático; 4 – expansor invertido de 2x; 5 – Atenuador variável; 6 – detector piroelétrico; 7 – fotodiodo; 8 – lente de comprimento focal longo; 9 – câmera CCD para medida do perfil espacial do feixe laser; 9 – entrada para o sistema de focalização; 11 – espelho controlado pelo detector de quadrante.

O material utilizado nos experimentos foi o vidro óptico BK7 (borossilicato crown da Schott), com planicidade $\lambda/10$ e polimento idêntico ao usado para espelhos laser. Como a limpeza é um dos parâmetros críticos que influenciam a medida do limiar de ablação, todas as amostras foram limpas com acetona em ultra-som por cerca de três minutos e secas com papel ótico para eliminar qualquer resíduo na superfície do vidro. Os parâmetros de limpeza adotados foram mantidos fixos para todas as amostras.

2.1. Limiar de ablação

A determinação do limiar de ablação para o BK7 foi obtida através da relação da (1), onde diversas medidas foram feitas com o intuito de relacionar D^2 à fluência utilizada. Assim, com a utilização do sistema descrito acima e uma lente de focalização de comprimento focal $f = 38\text{mm}$ um conjunto grande de danos foi feito na superfície do vidro com a variação da energia do pulso laser. Para cada valor de energia e sobreposição, um total de seis danos foram criados, cobrindo um intervalo de 2,4 a 7,5 J/cm^2 para pulsos únicos.

Para verificar a influência da sobreposição de pulsos e obter o parâmetro de incubação, o mesmo procedimento foi realizado, porém com sobreposição controlada do número de pulsos em uma mesma posição. Assim, para cada energia a amostra era irradiada com a sobreposição de 2, 4, 16, 32, 120, 510 e 1020 pulsos. Estas irradiações foram obtidas através do controle do sistema laser, que conta o número de pulsos e desloca a amostra para uma nova posição assim que o número pré-determinado é atingido. A Fig. (2) a seguir mostra o esquema de um destes conjuntos e a imagem de microscopia óptica para sobreposição de 510 e 1020 pulsos.

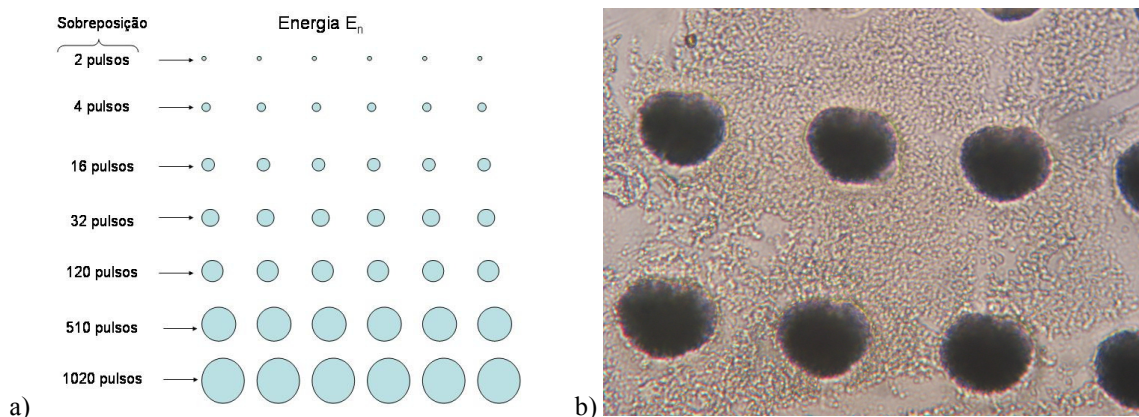


Figura 2. - a)Matriz de pontos com mesma energia variando a sobreposição (linhas) cada linha contém 6 elementos repetidos com mesma sobreposição. b) Imagem de microscopia óptica da zona afetada no BK7 com sobreposição de 510 pulsos (linha 1) e 1020 pulsos (linha 2).

O gráfico da Fig. (3) mostra a relação do diâmetro ao quadrado das marcações feitas pelo laser D^2 em função da fluência média F para cada pulso laser; a interceptação da reta média obtida fornece o valor de limiar de dano F_{th} . O mesmo procedimento foi feito para a obtenção da fluência de limiar para cada número N de sobreposição de pulsos. Verificou-se uma diminuição de F_{th} com o aumento de N conforme mostrado na Fig. (4). Os valores encontrados do limiar de dano para pulsos únicos bem como para múltiplas irradiações são mostrados na Tab. (1).

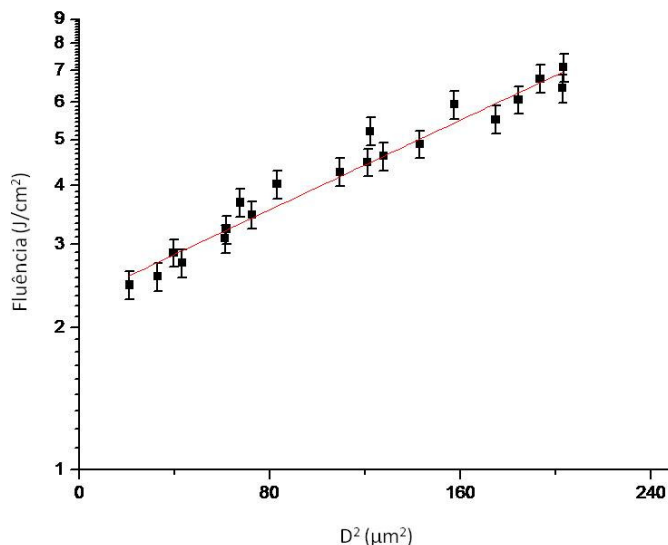


Figura 3. – Variação de D^2 em função da fluência média para pulso único. Limiar de ablação: $F_{th} = 2,3$ J/cm^2

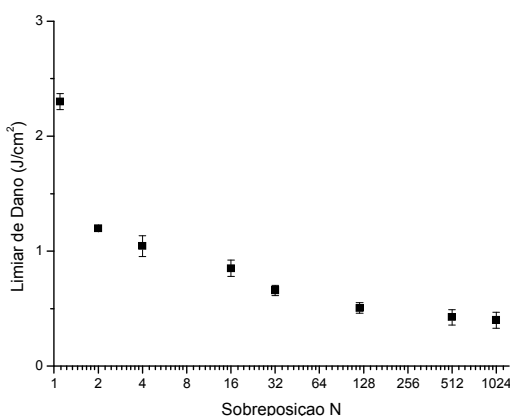


Figura 4. Limiar de dano $F_{th}(N)$ em função do número N de sobreposições.

Essas medidas foram utilizadas para o cálculo do parâmetro de incubação que prevê o valor do limiar de dano em função do número de pulsos sobrepostos. O parâmetro de incubação encontrado foi de $0,73 \pm 0,23$.

Tabela 1 – Valores de limiar de dano encontrado para diferentes sobreposições em Bk7.

Sobreposição N	$F_{th}(N)$ (J/cm ²)
1	$2,301 \pm 0,07$
2	$1,199 \pm 0,021$
4	$1,044 \pm 0,089$
16	$0,85 \pm 0,071$
32	$0,659 \pm 0,044$
120	$0,505 \pm 0,046$
510	$0,425 \pm 0,066$
1020	$0,399 \pm 0,069$

Foram feitas também medidas do volume de material extraído em função da energia para diferentes números de sobreposição de pulsos. A medida dos volumes de material extraído foi feita com os dados obtidos de um perfilômetro óptico VEECO® e são apresentados na Fig. (5).

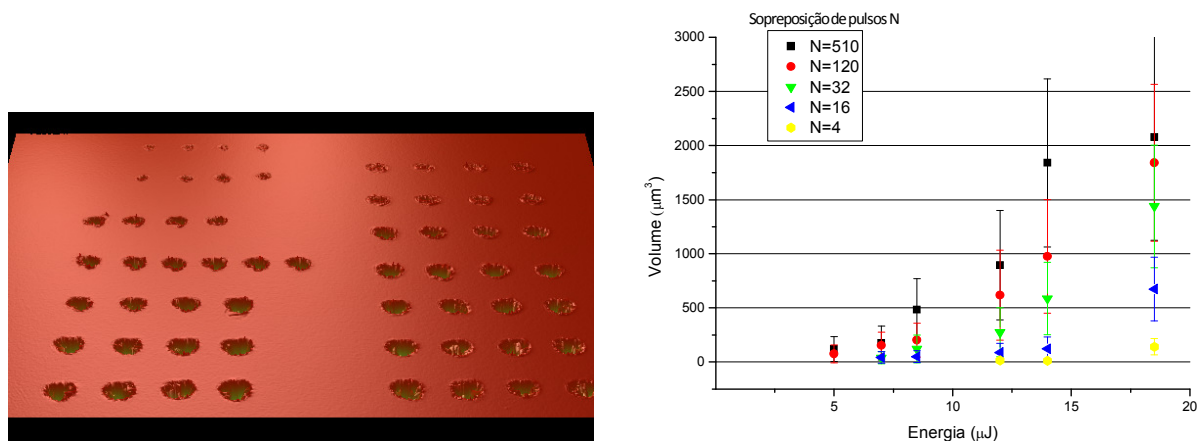


Figura 5. – Imagem obtidos de um perfilômetro óptico VEECO de dois conjuntos de pontos criados por diferentes sobreposições de pulsos (à esquerda); volume de material extraído em função da energia para diferentes sobreposições.

2.2. Usinagem de microcanais

Numa primeira abordagem para fabricação dos microcanais, foram irradiadas amostras de Bk7 com pulsos de 32 µJ de energia, correspondendo a uma fluência de ($F= 22 \text{ J/cm}^2$). Cada canal, com comprimento total de 1mm, foi usinado por um conjunto de varreduras paralelas formando uma largura total de 100µm. A distância lateral entre cada varredura foi variada com o objetivo de melhorar o acabamento do fundo do canal e de suas paredes, chegando a uma seção o mais retangular possível. O número de pulsos sobrepostos (longitudinalmente ao canal) é obtido pela relação entre a velocidade de varredura V , o diâmetro do feixe no ponto focal ϕ_{foco} , e a taxa de repetição T de pulsos, conforme a Eq(4):

$$N = (\phi_{\text{foco}} \cdot T) / V \quad 4$$

A Fig. (6) mostra um esquema do percurso do feixe laser e uma imagem de OCT (Tomografia de Coerência Óptica) de quatro canais obtidos desta maneira. Todos foram usinados com a mesma velocidade de translação do feixe laser, correspondendo a uma sobreposição de 500 pulsos num total de duas camadas de irradiação com percursos simetricamente opostos. As distâncias das varreduras laterais foram de 10, 20, 30 e 40 µm para os canais 1, 2, 3 e 4 respectivamente. O número total de varreduras por canal garantiu uma largura aproximada de 100 µm para cada um.

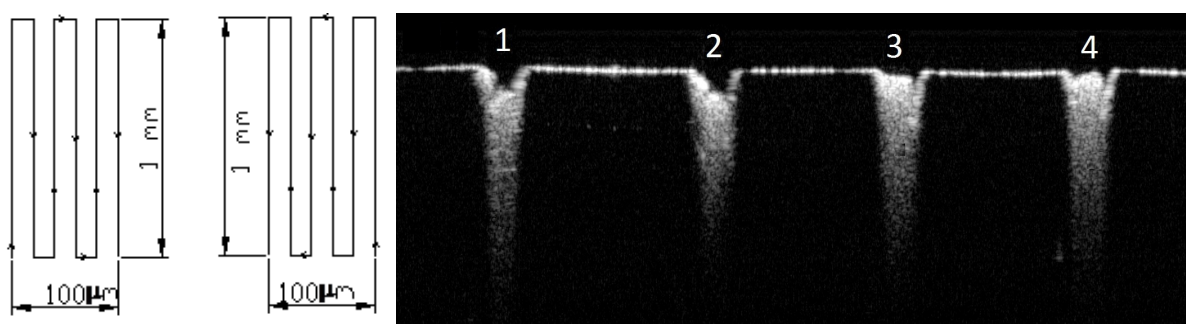


Figura 6. Esquema dos caminhos do feixe laser em cada camada e imagem de OCT dos primeiros ensaios de microusinagem de microcanais. Canal 1 com largura de 100 micros e profundidade de 50 microns.

Apesar da irradiação controlada e uniforme, uma assimetria e conicidade foi verificada nos perfis desses canais. A imagem de OCT também mostra uma região esbranquiçada cônica e muito profunda e afetada logo abaixo do canal usinado. Esta região, não corresponde a um dano físico catastrófico, mas sim a uma mudança local do índice de refração. Do ponto de vista de utilização prática destes canais, tal defeito não implicara em um problema, mas nos mostra que a energia do pulso não está sendo bem utilizada para a remoção de material, e parte dela penetra para além do fundo do traço. Explicamos este fato pelo efeito de incubação, que ao mesmo tempo em que reduz o limiar de ablação também aumenta a taxa de remoção com o acúmulo da sobreposição de pulsos. Assim, conforme as camadas de usinagem vão se sobrepondo, uma camada abaixo da superfície usinada não é ablacionada, mas tem sua estrutura cristalina modificada (modificando o índice de refração). Este efeito, incubado, torna esta região mais susceptível à ação de ablação dos pulsos subsequentes. A geometria de usinagem, somada ao perfil espacial gaussiano dos pulsos laser leva então a esta estrutura verificada.

Para evitar o problema, uma nova estratégia de usinagem foi utilizada. Assim, os parâmetros de processo para cada camada foram calculados em função do número de camadas precedentes. Para as primeiras camadas os parâmetros foram os mesmos utilizados no processo anterior. Depois de quatro camadas usinadas, a velocidade de processo e o posicionamento lateral dos traços foram recalculados de maneira a levar em conta o efeito de incubação das irradiações anteriores. Isto significa que o diâmetro do dano aumenta com o número de pulsos sobrepostos, ou seja, para cada camada este efeito deve ser levado em conta para manter fixa a fluência utilizada. Quando isto não é feito, o resultado equivale a um aumento da ablação que acaba por afetar uma região mais profunda do material. Neste caso específico, dividimos a usinagem em conjuntos de quatro camadas, e para cada conjunto a velocidade e a sobreposição lateral foram recalculadas para compensar o efeito de incubação. O parâmetro de incubação medido foi utilizado para o cálculo do diâmetro do dano em função da energia e sobreposição N de pulsos. Em cada camada, a sobreposição lateral dos traços foi de 20 % do diâmetro da marcação feita pelo laser prevista pelo parâmetro de incubação.

Com a utilização desta estratégia, três conjuntos de canais foram usinados com energias de pulsos constantes de 10 μJ , 20 μJ e 33 μJ . Em todos os casos, a sobreposição máxima foi de $N = 128$ pulsos; a partir deste valor, o efeito incubador é saturado e os parâmetros de usinagem podem ser mantidos constantes. A Fig. (7) apresenta a imagem de OCT da seção transversal dos canais obtidos com esta estratégia. A Fig. (8) mostra a imagem obtida em MEV da ponta final de um destes canais usinado com $N = 128$ e $E = 33 \mu\text{J}$. Fica nítido não só a melhora no perfil dos traços bem como a ausência de uma região afetada abaixo do fundo dos canais.

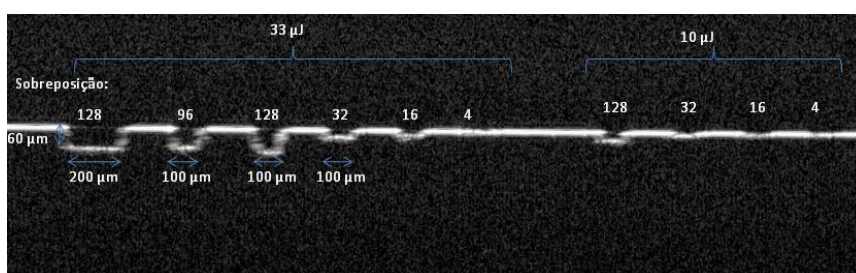


Figura 7. Perfil dos microcanais usinados com a estratégia que leva em conta os efeitos de incubação. O canal mais largo possui aproximadamente 200 μm de largura, os demais possuem 100 μm .

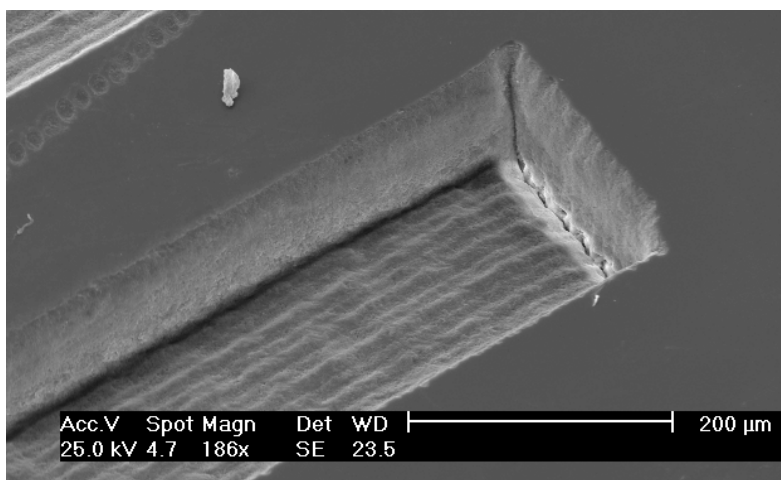


Figura 8. - Imagem obtida em MEV de um microcanal usinado com $N = 128$ e $E = 33 \mu\text{J}$.

Usando um rugosímetro mecânico (Zeiss Handysurf E-35B) foram medidas as profundidades dos canais em função da energia para esta nova estratégia de usinagem. Os resultados são apresentados no gráfico da Fig. (9).

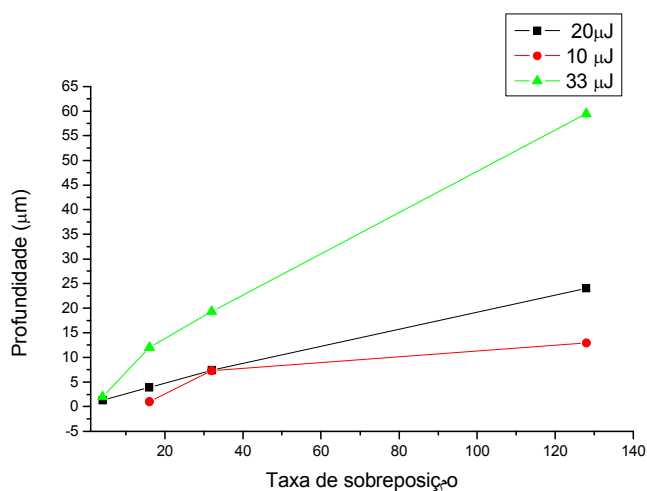


Figura 9. Profundidade do canal usinado em função da energia e taxa de sobreposição N para as energias de 10, 20 e 33µJ.

O aumento na profundidade usinada é bastante significativo com o aumento da energia. Uma elevação da energia por pulso de 10 para 33 µJ aumenta em mais de quatro vezes a profundidade produzida. Este aumento de eficiência vem de encontro à explicação da influência do parâmetro de incubação dado acima e demonstra o acerto da estratégia de usinagem utilizada.

A figura de MEV também mostra a ausência de rebarbas e bordas bem definidas; fica claro a ausência de material fundido e de micro-explosões nas bordas dos canais. Estas características atestam a ausência de efeito térmico pronunciado, mostrando que as fluências usadas não foram capazes de criar trincas ou zona afetada pelo calor.

A aplicação prática deste tipo de canal em microfluídica também está sendo desenvolvida, e um dispositivo para esta finalidade foi usinado e é mostrado na Fig. (10). Este dispositivo é composto de 46 canais paralelos e conectados entre si, com largura e profundidade de aproximadamente 100 µm; os círculos são utilizados como entrada e saída de fluidos.

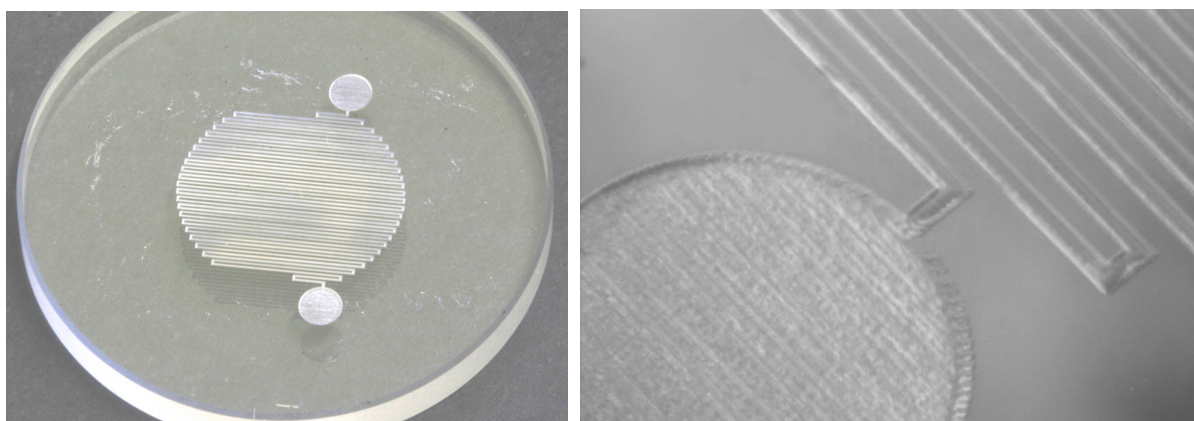


Figura 10 – Dispositivo para microfluídica em vidro BK7 composto de 46 microcanais com seção transversal de 100 x 100 µm².

3. CONCLUSÃO

A teoria do processo de ablação prevê a possibilidade da usinagem de vidros transparentes com pulsos ultracurtos pelo processo de ablação determinístico, que garante alta precisão sem zona afetada pelo calor. Para isso, alguns parâmetros fundamentais de usinagem com pulsos curtos, como limiar de dano, taxa de remoção de material e parâmetro de incubação foram medidos. A partir da usinagem de alguns microcanais foi verificado que o efeito de incubação influencia muito no processo de fabricação, e que se deve desenvolver uma estratégia de usinagem adequada. Alguns testes de usinagem de microcanais foram fundamentais para a criação de uma estratégia que permitiu um controle dimensional preciso do canal usinado, resultando em uma boa qualidade da

borda, alto grau de perpendicularismo das paredes e um fundo plano. Esse novo procedimento foi usado para a fabricação de um dispositivo microfluídico com seção transversal de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$.

4. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve financiamento FAPESP processos 2008/00284-0 e 2009/07912-0, 00/15135-9 e CNPq processos 473239/2009-4 e 310111/2009-9.

5. REFERÊNCIAS

- Aguilar, C. A., Y. Lu, et al. (2005). "Direct micro-patterning of biodegradable polymers using ultraviolet and femtosecond lasers." *Biomaterials* 26(36): 7642-7649.
- Ashkenasi, D., A. Rosenfeld, et al. (2002). Laser-induced incubation in transparent materials and possible consequences for surface and bulk micro-structuring with ultrashort pulses. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.
- Bloembergen, N. (Mar 1974). "Laser-induced electric breakdown in solids." *Quantum Electronics, IEEE Journal of* 10 (3): 375 - 386.
- Burns, M. A., B. N. Johnson, et al. (1998). "An Integrated Nanoliter DNA Analysis Device." *Science* 282(5388): 484-487.
- Efimov, O., S. Juodkazis, et al. (2004). "Intrinsic single- and multiple-pulse laser-induced damage in silicate glasses in the femtosecond-to-nanosecond region." *Physical Review A* 69: 42903.
- Itina, T. and N. Shcheblanov "Electronic excitation in femtosecond laser interactions with wide-band-gap materials." *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 98(4): 769-775.
- Jones, S. C., P. Braunlich, et al. (1989). "Recent progress on laser-induced modifications and intrinsic bulk damage of wide-gap optical materials." *Optical Engineering* 28: 1039-1068.
- Krishna Chaitanya Vishnubhatla, N. B., Roberta Ramponi, Giulio Cerullo, Roberto Osellame (2009). "Shape control of microchannels fabricated in fused silica by femtosecond laser irradiation and chemical etching." *OPTICS EXPRESS* 17(10).
- P.T. Mannion, S. F., D.S. Ivanov, G.M. O'Connor, T.J. Glynn (2005). "Experimental Investigation of Micromachining on Metals with Pulse Duration in the Range of the Electron-Phonon Relaxation Time (Pico to Sub-Picosecond)." *Proceeding Lasers in Manufacturing (LIM)*: 521-526
- Perry, M. D., B. C. Stuart, et al. (1999). "Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials." *Journal of Applied Physics* 85(9): 6803-6810.
- Stoian, R., A. Rosenfeld, et al. (2002). "Surface Charging and Impulsive Ion Ejection during Ultrashort Pulsed Laser Ablation." *Physical Review Letters* 88(9): 097603.
- Sugioka, K., Y. Hanada, et al. (2007). "3D integration of microcomponents in a single glass chip by femtosecond laser direct writing for biochemical analysis." *Applied Surface Science* 253(15): 6595-6598.
- Tripathi, A. "Microfluidics Reactors for Diagnostic Applications." *Annual Review of Biomedical Engineering* 13(1).

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído nesse trabalho.

MICROCHANNELS MACHINING WITH FEMTOSECOND LASER FOR USE IN MICROFLUIDICS

Machado, Leandro Matioli; Samad, Ricardo Elgul; de Freitas, Anderson Zanardi; Vidal, José Tort; Vieira, Nilson Dias; Nogueira, Gessé Eduardo Calvo Nogueira; de Rossi, Wagner

Center of Lasers and Applications, IPEN/CNEN-SP, Av Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, 05508-000, São Paulo-SP

Abstract

The study of microfluidics has enabled the development of integrated devices incorporating microchannels, electronics, optical and mechanical type lab-on-a-Chip. This trend was largely driven by the introduction of new technologies for microfabrication, such as laser micromachining and microlithography. In particular, the use of femtosecond lasers in this type of machining has been very promising, especially for its high accuracy and independence of the type of material used. We have developed a technique for producing microchannel in optical glass BK7 with ultrashort laser pulses with 55 fs of temporal width.

The objective was to obtain basic parameters of the process that guide to an accurate dimensional control of the channel machined, resulting in a good quality edge, high degree of perpendicularity of the walls and a flat bottom. These parameters were obtained according to the intensity, fluence, overlapping pulses and the incubation effect. The incubation parameter, and the volume extracted per pulse, were obtained by measuring the fluence threshold for the number of overlapping pulses.

The tests were analyzed by SEM, optical microscopy, mechanical and optical profiler. The accuracy of the process allows for controlled removal of material in extremely small volumes by focusing the laser beam diameter of few microns, with the possibility of interaction in depth of a few hundred nanometers. So it is possible to obtain channels with width from 5 microns and depths from a few hundred nanometers. For use in microfluidics, however, the microchannel should be larger, and for this application were produced channels with dimensions of 100 x 100 microns, and a microfluidic device was fabricated and is shown at work.

Keywords: *Keywords: femtosecond laser, micromachining, microchannels, optical glasses*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.