

CORTE E FURAÇÃO DE DIAMANTE-CVD COM LASER DE VAPOR DE COBRE

E.J. Corat, N. Ferreira Leite, M.C. Nono, V.J. Trava-Airoldi
LAS/INPE - São Jose dos Campos
R.M. Anazawa, Kam K. Yum, A.L. Ribeiro, R. Riva
IEAV/CTA - São Jose dos Campos

A tecnologia de crescimento de diamante-CVD esta em pleno desenvolvimento no LAS/INPE, tendo algumas aplicações já em fase de viabilização para industrialização. O desenvolvimento de técnicas de processamento do diamante-CVD é essencial para o domínio completo de sua tecnologia. Devido a suas propriedades de alta dureza, alta difusividade termica e mercia quimica, o processamento a laser e dos unicos metodos eficientes de processamento. Neste trabalho apresentamos os primeiros resultados de corte e furação do diamante-CVD com o uso de lasers de vapor de cobre (LVC), desenvolvidos e construidos no IEAV/CTA.

I- INTRODUÇÃO

O crescimento de filmes finos e autosustentados, policristalinos ou mesmo monocristalinos, de diamante obtido pela deposição química a partir da fase vapor ('Chemical Vapor Deposition - CVD'), é uma tecnologia que vem amadurecendo rapidamente nos últimos anos. Impulsionados pela vasta gama de aplicações deste nobre material, muitos grupos se estabeleceram nesta área, caracterizando uma verdadeira explosão neste desenvolvimento[1-2]. A maioria das aplicações potenciais do diamante-CVD[3], como em dispositivos eletrônicos rápidos e de alta potência, janelas ópticas, litografia de raio-X, ferramentas de corte e abrasão, dispositivos resistentes ao desgaste, e em outras, não necessitam apenas de sua produção, mas, também, da disponibilidade de métodos adequados de pós-processamento.

O pós-processamento do diamante-CVD não é facilmente realizável através de métodos convencionais, devido a sua extrema dureza e inércia química, de forma que novos métodos de polimento, erosão, corte e furação devem ser pesquisados. A técnica tradicional de corte de diamante através de serras a base de pó de diamante cortam a uma velocidade entre 0,1 a 1 mm/h, enquanto que com o corte a laser pode-se atingir acima de 700 mm/h[4]. Por isto, o uso de feixes laser para o corte de diamante ganhou importância comercial significativa durante a última década, sendo os lasers de Nd-YAG os mais comumente usados. Também, lasers de excimeros[5] e lasers de CO₂ [6] foram usados.

Neste trabalho apresentamos os primeiros testes de corte e furação de diamante-CVD com um laser de vapor de cobre (LVC), demonstrando a viabilidade de aplicação do mesmo para o processamento de materiais. As características temporais dos pulsos do LVC e a alta difusividade térmica do diamante dão a este trabalho grande interesse científico. Na seção II descrevemos brevemente o método de obtenção do diamante-CVD utilizados nestes experimentos, na seção III descrevemos o LVC e suas principais características, na seção IV apresentamos a morfologia da região de corte, em vários exemplos práticos, na seção V discutimos qualitativamente o processo de corte.

II- CRESCIMENTO DE DIAMANTE-CVD

As bolachas e cabeças de diamante-CVD utilizadas nestes experimentos foram preparadas em um reator de crescimento de diamante assistido por filamento quente, conforme esquematizado na Fig. 1, que foi completamente desenvolvido no LAS/INPE[7]. O diamante foi crescido sobre substrato de molibdênio na forma de

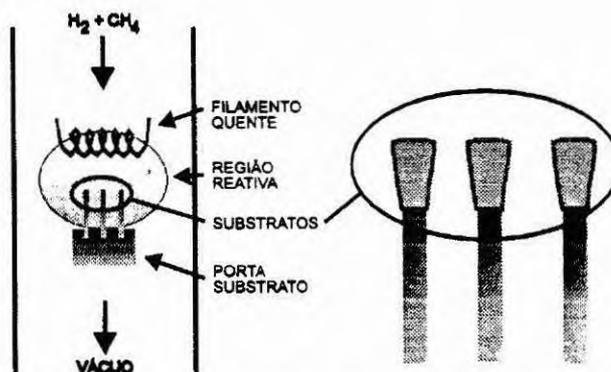


Figura 1 Esquema do reator de crescimento de filmes de diamante-CVD, assistido por filamento quente, exemplificando o crescimento de cabeças para pontas odontológicas.

placas e fios, para a obtenção de bolachas e cabeças de diamante, respectivamente. Os substratos foram polidos previamente com pasta de diamante de 4 µm e limpos em banho de ultra-som com acetona. Os crescimentos foram feitos em período de 24 a 36 horas, com um fluxo de 100 sccm de uma mistura gasosa composta de 2 vol% de CH₄, 0,5 vol% de CF₄ e 97,5 vol% de H₂. A pressão no reator foi mantida em 50 Torr. As temperaturas do filamento e do substrato eram, respectivamente, 2200 °C e 850 °C. Taxas de crescimento entre 7 e 15 µm/h foram obtidas. As bolachas de diamante-CVD obtidas tinham espessura de até 200 µm, com área de 10 X 25 mm². As cabeças de diamante-CVD tinham a forma adequada para a fabricação de pontas odontológicas e tinham paredes entre 100 e 250 µm de espessura. Todos os filmes crescidos eram de diamante-CVD de boa qualidade, como mostra o espectro Raman típico das mesmas, apresentado na Fig. 2.

III- LASER DE VAPOR DE COBRE[8]

O LVC é, atualmente, uma das mais importantes fontes de radiação coerente visível. Ele emite radiação nos comprimentos de onda 510,6 nm (verde) e 578,2 nm (amarelo), que podem ser utilizados de modo prático e eficiente. O LVC combina duas propriedades importantes: opera em regime pulsado, com pulsos de curta duração, na ordem de 30 ns (~10 ns com cavidade instável), o que caracteriza uma alta potência de pico; e opera com frequências de repetição elevada (~5kHz), o que lhe confere altos níveis de potência média. Para o processamento de materiais estas duas

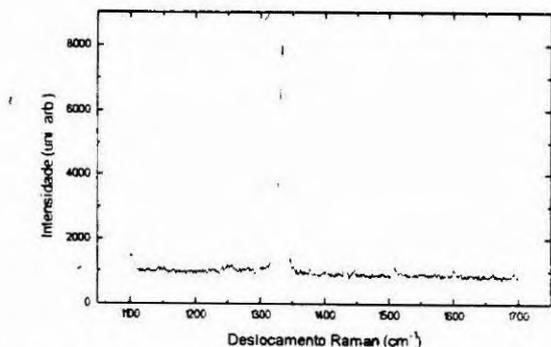


Figura 2. Espectro Raman típico do diamante-CVD produzido no LAS/INPE

características são importantes, o que torna o LVC adequado para esta aplicação

O laser utilizado nestes experimentos foi completamente desenvolvido no IEAv/CTA e, como esquematizado na Fig 3, foi montado com uma cavidade instável auto filtrante[9], o que reduz a potência média, mas permite a obtenção de um feixe quase gaussiano, de baixa divergência, de grande utilidade para o processamento de materiais. Nas condições utilizadas nestes experimentos, o laser fornecia 9 W de potência média, a uma taxa de repetição de 10 kHz. Nos experimentos de corte de diamante-CVD foi utilizada uma lente plano-convexa com distância focal de 150 mm, que fornece um feixe com diâmetro de cerca de 100 μm na região focal. Estima-se uma intensidade de cerca de 1 GW/cm^2 na região de corte

IV- CORTE DO DIAMANTE-CVD COM O LVC

Os filmes auto-sustentados de diamante-CVD foram analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), antes e após o corte. A morfologia típica, para as condições de crescimento descritas, apresenta filmes policristalinos com uma predominância de grãos individuais com faces octaédricas {111}. Estes filmes têm um crescimento colunar característico, que prevalece ao longo de toda a espessura do filme, e estes grãos observados na superfície são as extremidades destas colunas [3]. A dimensão lateral característica dos grãos variava entre 30 e 80 μm , dependendo da amostra.

A Fig.4 mostra um canal feito com o laser na superfície do filme de diamante-CVD. Esta figura mostra claramente que ao nível da superfície, a dimensão lateral do canal é equivalente à dimensão lateral dos grãos, que também é da mesma ordem de grandeza do diâmetro do feixe

Do ponto de vista macroscópico, a região de corte, em torno do canal, apresenta uma coloração preta característica do processo de grafitação. Quando o diamante é aquecido acima de 1300 $^{\circ}\text{C}$ ele grafita espontaneamente devido à criação de ligações livres nos carbonos da superfície, que reagem entre si formando ligações grafíticas. O processo de corte envolve o aquecimento dos grãos, pelo feixe laser acima desta temperatura, com a subsequente grafitação[10]. O processo de grafitação é importante no processo de corte, por dois motivos, primeiro, a remoção de material ocorre pela oxidação da área grafitada, e segundo porque a superfície preta desta região tem uma maior absorção do feixe laser, aumentando a eficiência do corte.

A Fig. 5 mostra a imagem de MEV de um furo feito posicionando a amostra de diamante-CVD no foco do feixe do LVC,

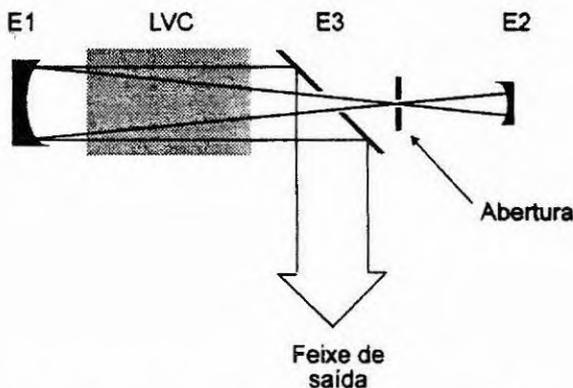


Figura 3. Esquema do laser de vapor de cobre com cavidade instável autofiltrante



Figura 4: Microscopia eletrônica de varredura de um sulco feito com um laser de vapor de cobre sobre uma placa de diamante-CVD. A escala está indicada na fotografia.

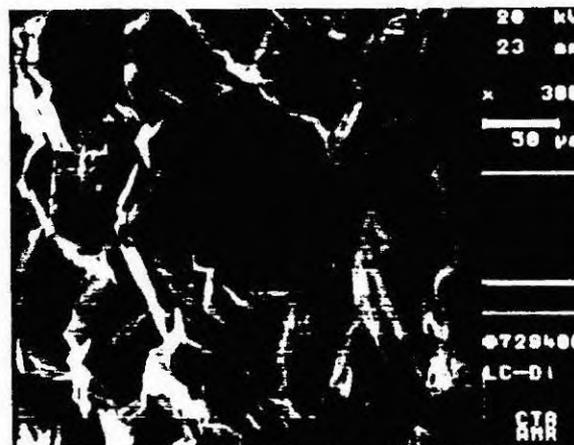


Figura 5: Microscopia eletrônica de varredura de um furo feito com um laser de vapor de cobre sobre uma placa de diamante-CVD. A escala está indicada na fotografia.

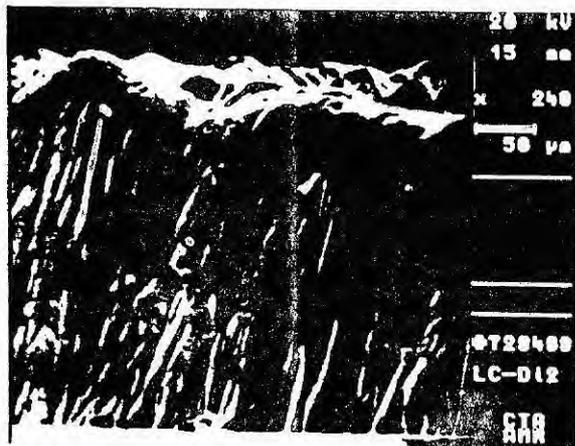


Figura 6. Microscopia eletrônica de varredura da seção de corte de uma placa de diamante-CVD, mostrando a estrutura colunar. A escala está indicada na fotografia.

e liberando a passagem do feixe por apenas alguns segundos. Note que, novamente, o diâmetro do furo ao nível da superfície é da mesma ordem de grandeza que o diâmetro do feixe, tendo dimensão equivalente ao tamanho de grão da superfície.

Na Fig. 6 é mostrada a seção reta de uma superfície de corte. O que se observa é que um dos lados do corte é vertical, gerando uma seção reta plana como a observada nesta figura. Este é um resultado prático importante para as mais variadas aplicações. Além disso, observa-se que a superfície desta seção reta é pouco rugosa, mas que a estrutura colunar ficou evidenciada, indicando que de certa forma o corte está limitado no contorno de grão.

Um exemplo prático importante para a aplicação do corte de diamante-CVD com o LVC, é no corte de aparelhagem das cabeças de diamante-CVD crescidas para a fabricação de pontas odontológicas, desenvolvidas no INPE. A Fig. 7 mostra a superfície de corte de uma cabeça de diamante-CVD. Para a realização deste corte foi usado um dispositivo para girar a cabeça em torno de seu eixo, mantendo a superfície do diamante na posição focal do laser, de forma a cortar o contorno mostrado na figura. Observe o excelente acabamento obtido. Não foram feitos testes exaustivos para a determinação da velocidade de corte, mas, era possível cortar com apenas uma passagem, a uma velocidade de 1 RPM (limitada pelo dispositivo que fazia girar as cabeças).

V- DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

É interessante, aqui, discutir como se processa o corte do diamante-CVD pelo LVC, tendo em vista as características particulares de ambos. Como foi discutido acima, o mecanismo de erosão do diamante, através de sua grafitização, exige que a temperatura da superfície na região de corte seja superior a cerca de 1300 °C, portanto, é necessário analisar em que condições isto é possível com o LVC.

Uma análise detalhada do processo de geração de calor pelo laser em conjunção com o processo de perda de calor pelo fluxo para fora da região irradiada, pode ser bastante complexo, uma vez que os tempos característicos de difusão térmica no diamante são muito pequenos. Na verdade, a condutividade térmica do diamante-CVD é bastante alta (a do diamante natural é acima de 20 W/cm.K, 5 vezes maior que a do cobre), o que torna o processo de aquecimento local mais difícil. A estrutura colunar policristalina do diamante-CVD influi bastante na sua condutividade térmica, pois, enquanto a condutividade térmica na direção das colunas (em cada grão) é comparável à do diamante natural, a condutividade térmica lateral pode ser até 5 vezes menor, dependendo da coalescência

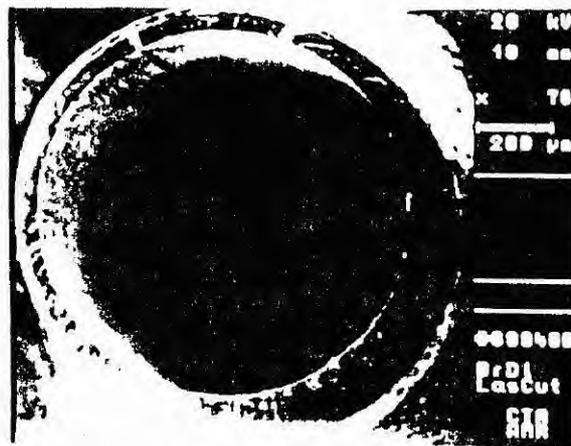


Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura da superfície de corte de uma cabeça de diamante-CVD para uso em pontas odontológicas.

entre os grãos. No entanto, é possível ter uma idéia qualitativa do que ocorre no processo de corte, se for feita uma avaliação do comprimento de difusão térmica dentro dos tempos característicos do LVC.

O tempo característico de difusão térmica é definido como [11]

$$\tau = \frac{D^2}{4\kappa},$$

onde D é o comprimento de difusão térmica no diamante e κ é a sua difusividade térmica ($\sim 12 \text{ cm}^2/\text{s}$).

Considerando a largura de pulso do LVC, pode-se obter um aquecimento bastante local, com comprimento de difusão da ordem de 7 μm . Mas, se considerarmos o tempo característico dado pela taxa de repetição do LVC, o filme de diamante-CVD deve ser considerado termicamente fino ($D \approx 700 \mu\text{m}$), de forma que todo o calor gerado é dissipado entre pulsos. Ou seja, no corte pelo LVC o parâmetro mais importante é a sua potência de pico.

De acordo com esta análise, o diâmetro do feixe é maior que o comprimento de difusão, indicando um aquecimento bastante localizado na região irradiada. O evidenciamento da estrutura colunar, conforme observado na Fig. 6, indica que, provavelmente devido à menor condutividade térmica lateral, existe a preferência pela remoção dos grãos individuais que são irradiados. Em nossos experimentos, verificamos que o controle da fluência do laser, através de uma focalização adequada do feixe, era crucial para a obtenção do corte. Baixas fluências não eram suficientes para cortar canais no diamante-CVD, ou então levavam a uma marcação apenas leve na superfície. Supõe-se que o corte com uma resolução melhor que o tamanho do grão seja possível, mas com uma redução drástica da velocidade de corte. Para uma determinação quantitativa são necessários estudos mais controlados, com medida da taxa de ablação do diamante-CVD, em função da fluência do LVC.

Resumindo, neste trabalho apresentamos os primeiros testes de corte e furação do diamante-CVD com o uso de um laser de vapor de cobre. O resultado mais significativo é a possibilidade prática de cortar placas relativamente espessas de diamante-CVD com um laser totalmente desenvolvido e construído no Brasil. Além disso, o laser utilizado tem potência apenas moderada em termos da tecnologia de LVC, o que demonstra a grande viabilidade de aplicação deste tipo de laser no processamento de diamante-CVD e também de outros materiais.

REFERÊNCIAS

- 1- J.C. Angus and C.C. Hayman. *Science*, **241**, 913 (1988); F.G. Celii and J.E. Butler, *Annual Review of Physical Chemistry*, **42**, 643 (1991)
- 2- V.J. Trava-Airoldi, C.R. Rodrigues, M. Fukui, and V. Baranauskas "Characterization of diamond films deposited by hot-filament CVD using CF_4 as doping gas by Raman spectroscopy, FTIR spectroscopy, and Atomic Force Microscopy" *Diamond Optics V*, SPIE - 1759, Ed. A. Feldman and S. Holly, 87 (1992)
- 3- W.A. Yarbrough and R. Messier. *Science*, **247**, 688 (1990)
- 4- M. Seal "Industrial Applications of Single-Crystal Diamond" in *Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology*, Ed. K.E. Spear and J.P. Dismukes. John Wiley & Sons - 1994
- 5- T.V. Kononenko, V.I. Konov and V.G. Ralchenko "KRF Excimer Laser Etching of Diamond-like Carbon Films" *Diamond Optics V*, SPIE - 1759, Ed. A. Feldman and S. Holly, 87 (1992)
- 6- N.I. Chapliev, T.V. Kononenko, A.A. Smolin and V.E. Strel'nitsky. *Surface and Coating Technol.*, **47**, 730 (1990)
- 7- M.C. Valera, J.F. Ribeiro, V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, A.F.V. Peña e N.F. Leite "Testes de Um Novo Conceito: Pontas de Diamante-CVD". *Revista Gaúcha de Odontologia*, submetido para publicação
- 8- R.M. Anazawa, R. Riva, N.A.S. Rodrigues, C.P. Cobra, K.K. Yum, A.L. Ribeiro, L.A.S. Toledo e C.A.R.S. Wahlbuhl "Laser de Vapor de Cobre de 10 Watts". *Nota Técnica IEAV-009/91*
- 9- R.M. Anazawa, N.A.S. Rodrigues, K.Y. Kam e A.L. Ribeiro "Características de Operação de um Laser de Vapor de Cobre com Cavidade Instável Autofiltrante", nos *Anais do V Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações*, Ed. M.M. Ferreira Vieira e N.D. Vieira Jr., pg 43, 1992
- 10- J. Narayan, V.P. Godbole and G. Matera, *J. Appl. Phys.*, **72**, 966 (1992)
- 11- J.F. Ready "Effects of High-Power Laser Radiation". Academic Press, 1971