INFLUÊNCIA DO BOMBARDEAMENTO IÔNICO NA QUALIDADE DE FILMES DE SiO₂ OBTIDOS POR DEPOSIÇÃO POR PLASMA DE TEOS+0₂

M. L. P. Silva¹, A. R. Cardoso² ¹malu@lsi.usp.br, ²rromanell@aol.com ¹Departamento de Sistemas Eletrônicos – EPUSP ²Escola de Engenharia Mauá Av. Prof. Luciano Gualberto, 158, Trav. 3 05508-900 - São Paulo, SP.

Palavras-chave: PECVD, íons, bombardeamento, modelo.

RESUMO

Neste trabalho estudam-se as principais influências do bombardeamento iônico na qualidade de filmes de SiO₂ obtidos por deposição química a vapor enriquecida por plasma, utilizando como fonte de silício o reagente TEOS (PETEOS). Para tanto, um sistema de PECVD foi modificado, incluindo-se uma rede equipotencial entre o eletrodo de RF e a lâmina de silício, permitindo-se alterar a intensidade do bombardeamento iônico. Os filmes depositados foram analisados por espectroscopia Raman e pelas técnicas C-V e I-V. Não houve diferenças consideráveis nas taxas de deposição, implicando que as espécies neutras são as principais responsáveis pela formação do filme. Verificou-se que a oxidação do TEOS na fase sólida (que causa a remoção de compostos de carbono do filme) e as características elétricas (histerese e constante dielétrica) dependem do bombardeamento iônico (íons de O₂). Em função dos resultados observados, desenvolveu-se um modelo qualitativo.

ABSTRACT

In order to unravel the majors influences of ion bombardment on PETEOS deposition, a PECVD system was modified to receive an equipotential screen between plasma and the silicon wafer. By modification of the screen potential, it was possible either to modify ion speed or to remove the ion bombardment. The films produced were analyzed by Raman spectroscopy, C-V and I-V techniques. Whereas there is no considerable differences among deposition rates, implying then that neutral chemistry are the main responsible for film formation, it was verified that the TEOS oxidation on solid phase (which causes removal of carbon compounds from the film) and electrical characteristics (hysteresis and dielectric constant) strongly depends of O_2 ion bombardment. A qualitative model was developed that explain the observed results.

1. INTRODUÇÃO

A técnica PECVD é reconhecidamente versátil e seu uso na deposição de óxido de silício a partir de tetraetilortossilicato (TEOS) é bastante difundido; contudo, algumas questões, como a influência dos íons no processo de deposição, neces-

sitam de uma atenção especial. Para a técnica PECVD, Hey [1] aponta que a velocidade de deposição está relacionada com a quantidade de energia transferida para o filme pelo bombardeamento iônico e, segundo Raupp [2], isto pode significar um mecanismo baseado, simultaneamente, no bombardeamento iônico e na reação com oxigênio atômico. Para a deposição de filmes de óxido de silício por TEOS, os

estudos restringem-se, principalmente, aos mecanismos de deposição por processos térmicos. Em fase gasosa, observase que os íons positivos originados por TEOS são capazes de produzir espécies iônicas com três ou mais átomos de silício, sugerindo um possível caminho para polimerização [3].

Por fim, as características elétricas, via de regra, não são correlacionadas com as propriedades físico-químicas, exceção à presença de hidrogênio [4,5,6].

Assim, o presente desconhecimento da importância dos íons e sua influência nos mecanismos de deposição, levaram-nos a verificar qual a influência do bombardeamento iônico nos parâmetros de deposição e nas características elétricas dos filmes acima citados.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Equipamento Utilizado

Os filmes de óxido de silício foram depositados pela reação de $Si(OEt)_4 + O_2$, em um sistema multicâmaras [7] utilizando-se a técnica PECVD.

Para a separação e aceleração dos íons, tanto oriundos de TEOS quanto de O_2 , contra o substrato de silício; uma rede metálica (cujo potencial foi modificado, para cada amostra, na faixa de -500 a 300 V) foi inserida próxima à superfície onde ocorre a deposição, conforme ilustra a figura 1.

A rede quando em potencial flutuante permite que o plasma se forme entre os dois eletrodos, contudo quando a tensão é aplicada, a região luminosa do plasma forma-se entre a rede e o eletrodo de RF. Caso uma tensão positiva seja aplicada, pode-se notar a formação de uma bainha de plasma na região superior da rede. Considerando-se que os íons não reagem à oscilação do campo para a freqüência de RF utilizada (13,56MHz), deve-se esperar que a tensão negativa aplicada à rede permita a extração de íons positivos do plasma. Estes íons bombardearão a superfície da amostra. Caso uma tensão positiva seja utilizada apenas espécies neutras e elétrons atingirão a amostra.



Figura 1: Arranjo para aceleração ou supressão de bombardeamento de íons utilizando a técnica PECVD

2.2 METODOLOGIA

Os experimentos foram efetuados em duas etapas distintas, utilizando-se de lâminas de silício, tipo p, de 75 mm de diâmetro, orientação cristalográfica <100> e resistividade 10-20 Ω .cm. As condições de deposição para todas as amostras são: pressão = 1 Torr, potência de RF = 200 W, temperatura de eletrodo = 360 °C e fluxos de O₂ e TEOS = 300 e 5 sccm, respectivamente.

Numa primeira etapa (amostras 1 a 8), estudou-se a influência numa faixa mais estreita da tensão aplicada à rede (-125 a 125V), expandindo-a (-500 a 300 V) numa segunda etapa (amostras 9 a 25). A tensão aplicada foi, na maioria das vezes, negativa, isto porque moléculas de TEOS e O_2 apresentam facilidade de formação de íons positivos [3].

Nestas etapas, utilizou-se a intermitência de reagentes e da tensão da rede para privilegiar o bombardeamento por um único tipo de espécie química. Assim, quando o fluxo de TEOS ou O_2 era mantido aberto por 10s e fechado por 60s (amostras 7, 8 e 15 a 18) pôde-se verificar a influência da variação da concentração deste reagente nas propriedades do filme.

A rede é mantida com tensão apenas quando o fluxo de TEOS ou O_2 é mantido fechado (amostras 19 a 25) primordialmente íons advindos de oxigênio ou TEOS, respectivamente, serão acelerados sobre a amostra.

Os filmes depositados foram analisados por elipsometria, para determinação do índice de refração e da espessura, e para cálculo da taxa de deposição.

A análise por microscopia Raman foi efetuada com o microscópio Renishaw – 3000 e foi utilizada para analisar as amostras quanto à existência de compostos de carbono e sua distribuição no filme.

Os compostos de carbono foram determinados obtendo-se o espectro Raman utilizando-se laser He/Ne [8]. A distribuição destes compostos foi determinada utilizando-se a microscopia óptica acoplada ao equipamento Raman para análise de regiões de $50\times80\mu$ m, com limite de resolução entre 1 e 2μ m [9]. Para cada região, determinou-se o número de heterogeneidades encontradas no filme, bem como seu diâmetro, obtendo-se para cada heterogeneidade o espectro Raman.

Para as caracterizações elétricas foram implementados capacitores MOS, com portas circulares de alumínio (diâmetro aproximado de 1 mm) depositadas por evaporação, numa pressão da ordem de 10^{-6} Torr, na evaporadora "Auto 306" da Edwards.

Os capacitores foram caracterizados eletricamente pelas técnicas C-V (alta freqüência) e I-V, utilizando-se os equipamentos "HP 4280A 1MHz C METER/C-V PLOTTER" e "HP4140B pA METER/DC VOLTAGE", respectivamente.

3. RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

3.1 Taxa de Ionização do Plasma

A corrente medida pelo amperímetro (figura 1), sempre foi inferior a 0,5 μ A, ao longo das duas etapas; ao contrário do que ocorre se um plasma de CF₄ é utilizado onde correntes de 1 μ A podem ser obtidas. Desta forma, observa-se que, nesta câmara, plasma de TEOS + O₂ apresenta baixa taxa de ionização. Este fato está de acordo com observações feitas a olho nu, já que no equipamento utilizado não se notava a bainha de plasma antes da inserção da rede.

3.2 Índice de Refração e Taxa de Deposição

O índice de refração obtido nas duas etapas não apresentou variação significativa (exceção às amostras 1 e 23 a 25); sendo seus valores, em geral, próximos a 1,44.

Para a primeira etapa, a taxa de deposição diminui sutilmente com a diminuição da tensão aplicada na rede. A deposição com a rede sem tensão aplicada (potencial flutuante), resulta numa taxa de deposição bem mais alta e num índice de refração marginalmente superior. Isto deve-se ao fato do plasma ultrapassar a rede nesta condição, ou seja, tanto as espécies ativas neutras como as iônicas estão presentes imediatamente acima da amostra.

Para a segunda etapa, as variações da taxa de deposição são pequenas, tendendo a um mesmo valor quando a tensão torna-se muito negativa, como mostram os gráficos da figura 2. Deve-se ressaltar que essa tendência independe de outras condições, tais como intermitência do fluxo ou da tensão da rede. Isto parece indicar que processos físicos, principalmente de bombardeamento, desempenham um papel importante na deposição em altas tensões negativas, ou seja, a energia com que o íon bombardeia a superfície é importante, como já ressaltou Hey [1].

Ainda é possível notar que, para as amostras 11 a 14 o aumento da tensão implicou em ligeiro aumento da taxa de deposição, assim, para esse grupo, o aumento do fluxo de íons significou o aumento da taxa de reação. Aqui, provavelmente, os íons participam da reação sem favorecer a remoção de espécies.

Por outro lado, para as amostras 15 a 18, onde o bombardeio é, principalmente, por íons advindos do O_2 , a taxa de deposição mantém-se constante, dominando, neste caso, a baixa concentração de TEOS. Para as amostras 19 a 25, tensões mais negativas diminuem a taxa de deposição, devido ao bombardeamento.

A grande diminuição observada na espessura com o aumento da tensão da rede, para filmes formados com alta concentração de íons de TEOS (amostras 23 a 25), indica que o bombardeamento deve estar favorecendo a remoção do filme por espirramento (sputtering) e levando à sua má formação (como verificada pela análise Raman).



Figura 2 Taxa de deposição em função da tensão aplicada à rede para as amostras 11 a 25 (acima) e apenas para as amostras 11 a 22 em escala ampliada (abaixo).

De modo geral, portanto, pode-se dizer que para altas tensões negativas, predominam os processos físicos, principalmente de espirramento, enquanto para tensões positivas ou menos negativas predominam os processos químicos. Este resultado era esperado, sendo significativo, contudo, que a faixa analisada permitisse constatar a variação dos comportamentos.

A não variação da taxa de deposição entre -300 e -500 V para as amostras 15 a 18 indica, portanto, uma situação eficiente em energia já a -300V; ou seja, a melhor situação para "energia disponível/molécula de TEOS" é aqui conseguida. Portanto, baixas concentrações de TEOS devem proporcionar os melhores filmes, o que é corroborado por estudos anteriores [9].

3.3 Raman

Via de regra, a aparência do filme sob o microscópio óptico presente no equipamento Raman, corresponde a de uma superfície composta por micro regiões "escuras" e "claras", denominadas neste trabalho, por "pontos" e "nódulos", respectivamente. Estas heterogeneidades compõem-se por compostos de carbono (pontos) ou silício (nódulos) [8,9].

As amostras da primeira etapa continham poucas heterogeneidades, apresentando pontos e nódulos com o diâmetro de aproximadamente $1\mu m$, homogeneamente distribuídos em toda a extensão da lâmina. A análise do filme mostrou carbono no limite de detecção da técnica para a maioria das amostras.

A tabela 1 mostra as principais espécies atingindo a amostra e as observações obtidas por microscopia Raman. As amostras da primeira etapa mostram que é mais difícil encontrar heterogeneidades se o fluxo de TEOS for intermitente, mesmo se o bombardeamento iônico não for permitido (amostra 6). Isto é uma forte indicação da importância da reação em fase sólida, onde a diminuição da concentração de TEOS permitiu uma melhor formação do filme e eliminação de compostos carbônicos.

A tabela 2, correspondente às amostras da segunda etapa, fornece o número de pontos e nódulos detectados em regiões de 50x80µm, bem como seus diâmetros, determinados pelo microscópio óptico do equipamento Raman. A análise Raman da segunda etapa de amostras mostrou uma forte correlação entre o número de heterogeneidades e a tensão na rede.

A figura 3 apresenta o número de pontos/região de 50x80µm, analisada na borda da lâmina, em função da tensão da rede. O valor para a amostra 10 não é mostrado no gráfico; por apresentar-se muito acima da média obtida. Assim, a altas tensões negativas, a oxidação dos compostos no filme em formação parece ser mais eficiente. Observa-se, contudo, que o aumento da tensão é efetivo apenas até cerca de -300V, para amostras 11 a 14, mas diminui continuamente para amostras 19 a 22.

Como neste último caso a aceleração foi principalmente dos íons de O_2 , percebe-se que estes são os mais eficientes para promover a oxidação dos compostos de carbono que porventura se encontrem no filme.

Observa-se, também, que a intermitência de TEOS (amostras 15 a 18) é útil apenas até -300V, após o que, provavelmente, a alta energia dos íons de O_2 favorece mais a reação de dessorção de TEOS do que as reações de formação do filme.

A baixa quantidade de pontos encontrados no filme com alta incidência de íons de TEOS (amostras 23 a 25) não é animadora, uma vez que este filme apresenta os pontos de maior diâmetro e está muito mal formado, encontrando-se vales (regiões de menor espessura no filme) e "pits" (regiões de maior espessura no filme). Estes vales e "pits" apresentam diâmetros da ordem de poucos micrometros.

AMOSTRA	$V_{REDE}(V)$	PRINCIPAIS ESPÉCIES ATINGINDO	RAMAN	COMENTÁRIOS
		A AMOSTRA		
1	flutuante	espécies ativas neutras e iônicas	C=C	
2	0	espécies ativas neutras e iônicas não ace-	C*	vários pontos e nódulos estão
		leradas	leradas	
3	+100	sem íons positivos	quantidade não pode ser determinada.	
4	-100	íons positivos de TEOS e O ₂ acelerados		
5	-125	íons positivos de TEOS e O ₂ acelerados	C*	
6	+125†	sem íons positivos	C*	
7	-125†	influência da concentração de TEOS		
				não se encontraram pontos
				ou nódulos
8	-125††	íons positivos de O ₂ acelerados		

Tabela 1: Principais espécies atingindo a amostra e observações obtidas por microscopia Raman para a primeira etapa.

* limite de detecção

† fluxo de TEOS intermitente (TEOS admitido: 10 s, fechado: 60 s)

†† fluxo de TEOS e V_{REDE} intermitentes (V_{REDE} aplicada quando TEOS fechado)

Tabela 2 Número da amostra, tensão da rede e principais espécies aceleradas sobre o eletrodo, e os nódulos de compostos carbônicos (denominados ptos) ou silício (denominados nod) visualizados por microscopia óptica no equipamento RAMAN em regiões de 50×80 μm

AMOSTRA	Vrede	PRINCIPAIS ES-	Número de pontos (ptos) ou nodulos (nod) presentes nas laminas e seus res-				
	(V)	PÉCIES	pectivos diametros (µm)				
			na borda na parte intermediária		no centro		
9	0	sem íons positivos	15 ptos, 1	10 ptos, 1	10 ptos, 1		
10	+300	sem íons positivos	60ptos, 1	20ptos, 1	30ptos, 1 ⁱ		
11	-200	íons positivos,	20ptos, 1 ⁱ	15ptos, 2	10ptos, 1 ⁱ		
12	-300	TEOS e O ₂	10ptos, 2	10ptos, < 1	10ptos, < 1		
13	-400		10ptos, < 1	15ptos, < 1	15ptos, < 1		
14	-500		10ptos, 1	10ptos, < 1	15ptos, < 1		
15	-200	variação na concen-	5ptos, < 1	5ptos, < 1	10ptos, < 1 ⁱ		
16	-300	tração de TEOS	2ptos/cm^2 , 1	não se encontraram pontos	não se encontraram		
			2nod, < 1		ptos ⁱⁱ		
17	-400		5ptos, < 1	não se encontraram pontos ⁱ	não se encontraram		
					pontos ¹		
18	-500		10ptos, < 1	10ptos, < 1 8ptos, < 1			
					1nod, 3		
19	-200	íons positivos de O2	10ptos, < 1	5ptos, < 1	5ptos, $< 1^{-1}$		
			2nod, 1				
20	-300 ⁱⁱⁱ		5ptos, << 1	5ptos, << 1	5ptos, << 1		
21	-400		5ptos, < 1	8ptos, < 1	8ptos, < 1		
22	-500 ^{iv}		não se encontraram	não se encontraram pontos	não se encontraram		
			pontos		pontos		
23	-200	íons positivos de	8ptos, 2	8ptos, 2	5ptos, 2		
24	-350 ^v	TEOS	amostra desuniforme, 2	amostra desuniforme	amostra desuniforme		
25	-500 ⁱ		3 ptos, 1	amostra desuniforme	amostra desuniforme		

ⁱ observa-se que vários pontos estão no limiar de detecção e não puderam ser determinados

ⁱⁱ observa-se que alguns pontos estão no limiar de detecção e não puderam ser determinados, amostra com a menor densidade de pontos já encontrada

 $^{\rm iii}$ amostra com a maior densidade de nódulos já encontrada, diâmetro superior a 2 μm

^{iv} amostra com aparência rugosa e com vales e "pits"

presença de regiões com pontos de diâmetro de 3 µm, nódulos, vales e "pits".



Figura 3 Números de pontos/região de 50x80µm analisada por microscopia óptica em função da tensão da rede.

3.4 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Pelas técnicas C-V e I-V foram extraídos diversos parâmetros elétricos, constantes nas tabelas 3, 4 e 5 (que também incluem a taxa de deposição e o índice de refração).

A tabela 3 refere-se às amostras que se diferenciam unicamente pela tensão de rede aplicada (primeira etapa / 1º grupo), resultando numa influência diminuta nos péssimos parâmetros elétricos resultantes (destacando-se as elevadas histereses e correntes de fuga). Contudo, nota-se que os correspondentes parâmetros elétricos apresentam uma tênue tendência à melhora com o incremento do bombardeamento por íons positivos (ou seja, com a tensão de rede mais negativa).

Deve-se notar, que para a obtenção de uma constante dielétrica da ordem de 4 (valor esperado para óxido de silício), um potencial de cerca de -1000 V deveria ser aplicado à rede (supondo-se uma relação linear entre a constante dielétrica e a tensão aplicada).

A tabela 4 ilustra a influência das intermitências do fluxo de TEOS e da tensão de rede (além de seu valor) nos parâmetros elétricos (primeira etapa / 2° grupo). Apesar de péssimos, resultam melhores (exceto a histerese) para a amostra 8 (íons de O_2 mais abundantes). Assim, atribui-se esta maior melhora, em relação ao 1° grupo, à maior remoção de subprodutos da reação.

Contudo, a maior abundância de íons de O_2 , deve gerar filmes com uma maior densidade de defeitos, pois a amostra 8 apresenta uma maior histerese em relação à 6.

A figura 4, (apresentada sob a forma de curvas corrente versus campo elétrico - "curvas I-E"), ilustra a sutil tendência de uma maior corrente de fuga para a amostra 6, justamente a que possui a menor intensidade de bombardeamento por íons positivos, corroborando a importância destes na formação do filme [3].

AMOSTRA	1	2	3	4	5	COMENTÁRIOS
V _{REDE} (V)	-	0	100	-100	-125	
taxa de deposição (Å/min)	2674	1825	1864	1817	1824	• curvas C-V/AF e I-E muito
índice de refração	1,449	1,447	1,444	1,443	1,444	semelhantes entre si
constante dielétrica	8,6	8,9	9,4	8,7	8,4	• I _{FUGA} sutilmente maior sem
Vfb (V)	-1,3	-1,3	-1,5	-1,2	-1,4	a aplicação de V _{REDE}
histerese (V)	2,5	2,6	2,5	2,8	2,8	 sutil tendência: diminuição
$Qef/q (10^{11} cm^{-2})$	1,6	2,6	3,3	2,0	2,4	da constante dielétrica com
I _{FUGA} para 1-2 MV/cm (A)	~10 ⁻⁵ ↑	~10 ⁻⁵	~10 ⁻⁵	~10 ⁻⁵	~10 ⁻⁵	a diminuição de V_{REDE}

Tabela 3 Parâmetros elétricos extraídos das amostras da primeira etapa (1º grupo).

Tabela 4 Parâmetros elétricos extraídos das amostras da primeira etapa (2º grupo).

AMOSTRA	6	7	8	COMENTÁRIOS
V _{REDE} (V)	+125	-125*	-125†	
taxa de deposição (Å/min)	1903	1851	1863	
índice de refração	1,444	1,448	1,447	• I _{FUGA} sutilmente maior
constante dielétrica	15	11	9,0	para $V_{REDE} = +125 V$
Vfb (V)	-1,6	-2,6	-1,5	 constante dielétrica:
histerese (V)	2,1	1,2	1,9	diminui com a prévia
$Qef/q (10^{11} cm^{-2})$	4,0	11	3,1	seleção dos íons pos. de O2
I _{EUGA} para 1-2 MV/cm (A)	~10 ⁻⁵ ↑	~10 ⁻⁵	~10 ⁻⁵	

* fluxo de TEOS intermitente (TEOS admitido: 10 s, fechado: 60 s)

† fluxo de TEOS e V_{REDE} intermitentes (V_{REDE} aplicada quando TEOS fechado)

AMOSTRA	10	14	16*	18*	22*	25**	COMENTÁRIOS
V _{REDE} (V)	300	-500	-300	-500	-500†	-500†	
taxa de deposição (Å/min)	1332	1459	1495	1487	1472	725	< taxa de deposição
índice de refração	1,441	1,432	1,434	1,433	1,434	1,457	índ. de refr. ~1,46
constante dielétrica	9,4	9,6	10,6	10,1	12,9	8,8	< constante dielétrica
Vfb (V)	-5,8	-1	-1	-1,1	-1,3	-1,5	↓
$Qef/q (10^{11} cm^{-2})$	39	1,2	1,7	1,5	4,1	8,0	< corrente de fuga
I _{FUGA} para 1-2 MV/cm (A)	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	10-6~10-4	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	~10 ⁻⁷	

Tabela 5 Parâmetros elétricos extraídos de algumas das amostras da segunda etapa.

* TEOS intermitente (TEOS admitido: 10 s, fechado: 60 s)

** TEOS e O2 intermitente (TEOS e O2 admitido: 10 s, fechado: 60 s; TEOS fechado quando O2 admitido)

† tensão da rede intermitente (V_{REDE} aplicada quando TEOS fechado)



Figura 4 Curvas I-E para as amostras da primeira etapa/2° grupo (acima) e da segunda (abaixo).

A tabela 5, ilustra tendências semelhantes para a segunda etapa, porém, de forma bem mais incisiva (em função de uma maior V_{REDE}). A amostra 10 demonstra claramente a importância do bombardeamento iônico. Contudo, a amostra 25 apresenta a maior carga efetiva no óxido, dentre as que correspondem a V_{REDE} negativa, indicando que o excessivo bombardeamento iônico resultou em um filme com uma alta densidade de defeitos. Isto é corroborado pelas medidas Raman, observando-se que este filme apresentou a maior não-uniformidade superficial.

Destaca-se, na figura 4, a baixa corrente de fuga desta amostra, indicativa do efeito deletério do bombardeamento por íons de O_2 ; ou seja, estes apresentam efeitos opostos: remoção de compostos carbônicos e aumento de defeitos do filme. Neste caso, a ativação do O_2 só pode ocorrer pelo bombardeamento por íons de TEOS, reconhecidamente menos reativos que íons de O_2 ; assim, o processo indireto de ativação da molécula de O_2 deve levar a uma menor densidade de defeitos no filme. Adicionalmente, esta amostra possui o índice de refração mais próximo ao típico de um óxido térmico e a menor taxa de deposição, que é reconhecidamente um dentre os fatores que mais influenciam na qualidade de filmes depositados [10].

4. DISCUSSÕES

Nas deposições de filmes por plasmas, deve-se considerar tanto as reações que ocorrem na superfície quanto às no plasma. Para as primeiras, a adsorção dos reagentes é fundamental, bem como fornecimento de energia para as reações de formação do filme.

No caso do plasma, a oxidação de TEOS torna-se de maior importância, pois este é o modo de garantir a remoção de compostos de carbono.

Na fase gasosa, a oxidação pode ser melhorada pelo aumento da relação O_2 /TEOS. E esta parece ser a alternativa utilizada em processos [11] para deposição a baixa temperatura [10].

Só há duas maneiras para se fornecer energia para as reações em superfície: aumento da temperatura do substrato ou aumento do bombardeamento iônico. O primeiro procedimento fica impossibilitado pelas exigências da tecnologia multinível; assim, torna-se de fundamental importância o bombardeamento iônico.

Neste contexto, o bombardeamento mais eficiente é aquele que provê uma espécie capaz de reagir. Portanto, átomos ou íons de oxigênio (espécies reconhecidamente bastante reativas) são importantes para a obtenção de filmes com melhores propriedades.

Quanto às espécies neutras, deve-se considerar que se uma espécie ativa com menor quantidade de átomos de carbono for formada, a estrutura do filme poderá ser melhorada. Neste aspecto é importante considerar as espécies iônicas que TEOS pode formar e a energia envolvida neste processo [3,12]; observa-se neste caso, então, que as espécies que necessitam de maior energia para serem formadas são as capazes de estabelecer polimerização em fase gasosa.

A correlação encontrada entre as características elétricas e as análises químicas efetuadas neste trabalho mostra que sistemas de deposição por plasma onde se encontram espécies ativas de TEOS e O_2 com alta energia são os mais efi-5. CONCLUSÕES

Para sistemas TEOS + O_2 , a melhor condição para obtenção de filmes de boa qualidade é a que utiliza alta densidade de potência de RF, pois garante, ao mesmo tempo, espécies iônicas e neutras capazes de formar filmes com pequena concentração de compostos de carbono. Esta é a melhor explicação para o atual sucesso dos sistemas de deposição por plasmas de alta densidade [13].

Para o sistema sob estudo, os dados obtidos apontam indubitavelmente para a importância das reações em fase sólida; parecendo que estas são as de maior importância no conjunto (predominam durante os processos); explicando muito dos comportamentos obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hey, H. P. W., Shijik, B. G., Hemmes, D. G., Solid State Techn., april, 139 (1990)

2. Raupp, G. B., Cale, T. S., Hey, H. P. W., *Chem. Prespectives Microelectronics Mater. II Symp.* 495 (1991)

cientes.

3. Silva, M. L. P., Química iônica de TEOS, TMOS e TMB e sua relevância para a microeletrônica, Tese, IQUSP (1995)

4. Xie, J. Z., Murarka, S. P., Guo, X. S., Lanford, W. A., *J. Vac. Sci Technol.* B 6 (6), 1756 (1988)

5. Veprek-Heijman, M. G. J., Boutard, D., *J. Electrochem. Soc.* 138 (7), 2042 (1991).

6. Nishi, Y et al., Jpn. J. Appl. Phys. 31 (12B), 4570 (1992).

7. Morimoto, N. I.; Cardoso, A. R.; Silva, M. L. P.; Shibata, N. Y.; Escote, A. F.; Matsumura, W. T.; *Anais do VII SBMicro*, 565-574 (1992)

8. Silva, M. L. P., Cardoso, A. R., XII Congresso da Sbmicro, artigo 34 (1997)

9. Avaliação das características elétricas de filmes de SiO₂ obtidos por deposição química a vapor, enriquecida por plasma, a partir de fonte orgânica TEOS, Cardoso, A.R., Tese, EPUSP (1997)

10. Deshmukh; C. S., Aydil, E. S., Appl. Phys. Lett. 65 (25), 3185 (1994)

11. D. A., Hackenberg, J. J., Linn, J. H., *J. Electrochem. Soc.* 143 (3), 1079 (1996)

12. Holtgrave, J., Riehl, K., Abner, D., Haaland, P. D., Chem. Phys. Lett. 548 (1993)

13. Pye, J.T., Fry, H. W., Schaffer, W. J., Solid State Techn. 38(12), 65 (1995)