

# IE 521 - Tecnologia de Circuitos Integrados

## Questionário

Prof. Jacobus W. Swart

### Cap. 1 - Introdução

- 1) Qual foi o primeiro transistor proposto e tentado sua fabricação? Qual era o problema para que o dispositivo funcionasse?
- 2) Quem, onde e quando foi descoberto o primeiro transistor bipolar?
- 3) Quando foi desenvolvido o primeiro transistor pMOS? Descreva a estrutura de um transistor pMOS e de um transistor nMOS. Porque se desenvolveu primeiramente a tecnologia pMOS e não a nMOS?
- 4) Onde e quando foi desenvolvido o processo planar para fabricar transistores e CI's?
- 5) Descreva o que vem a ser o processo planar.
- 6) Descreva uma porta CMOS, sua estrutura física e sua grande vantagem.
- 7) Descreva os 5 blocos construtivos de dispositivos, desenhando a estrutura de bandas correspondente a cada bloco.
- 8) Apresente uma comparação geral entre tecnologia CMOS e bipolar (velocidade, potência, densidade de integração, ganho e linearidade).
- 9) Qual a fração do mercado de semicondutores é dominado por tecnologia CMOS atualmente?
- 10) Quais são os três elementos evolutivos que tem levados ao aumento contínuo do nível de integração?
- 11) Quais as motivações para o contínuo aumento do nível de integração?
- 12) Liste a seqüência de fabricação de um processo nMOS simples.

### Cap. 3 - Tecnologia CMOS

- 1) Porque a primeira tecnologia MOS foi a pMOS e não a nMOS?
- 2) Porque a tecnologia nMOS apresenta desempenho superior que a pMOS?
- 3) Apresente e justifique a curva de transferência de uma porta CMOS. Qual a grande vantagem do CMOS?
- 4) Apresente as várias vantagens da tecnologia CMOS.
- 5) Quais as desvantagens associadas ao CMOS?
- 6) Descreva o fenômeno "Latch-up" em CMOS.
- 7) Quais são as possíveis fontes de disparo "Latch-up"?
- 8) O que deve ser feito para evitar "Latch-up"?
- 9) O que vem a ser efeito de canal curto? Porque ela ocorre e o que fazer para reduzi-la?
- 10) O que significa o fenômeno de "punchthrough"? O que deve ser feito para suprimi-la?
- 11) Quais os efeitos da resistência série parasitária?
- 12) Quais as componentes da resistência parasitária  $R_{DS}$ ?
- 13) Como podemos reduzir a resistência parasitária?
- 14) Porque num dado momento da evolução o tempo de atraso de uma linha de interconexão fica maior que a de uma porta? O que fazer para superar esta limitação?
- 15) O que são portadores quentes e o que eles produzem?

- 16) Quais são os efeitos associados aos portadores quentes?
- 17) Descreva uma solução para minimizar a injeção de portadores quentes.
- 18) Desenhe uma estrutura física CMOS e cite os 6 blocos de fabricação necessários.
- 19) Quais são os 6 tipos de estruturas CMOS?
- 20) Qual a motivação do uso da estrutura de ilhas gêmeas?
- 21) Qual a motivação do uso de ilha de perfil gradual?
- 22) Quais as vantagens da estrutura CMOS / SOI?
- 23) Descreva uma seqüência típica de obtenção de uma ilha tipo p.
- 24) Descreva uma seqüência de passos envolvidos na obtenção de isolamento em CMOS por processo LOCOS.
- 25) Descreva sucintamente 2 processos mais radicais de isolamento entre dispositivos.
- 26) Quais são os parâmetros ou efeitos que devem ser considerados no projeto da estrutura do canal dos transistores?
- 27) Que técnica de dopagem é fundamental para o ajuste de dopagem do canal?
- 28) Quais são os parâmetros da estrutura que afetam diretamente o  $V_T$  dos transistores e como devem ser variados para se aumentar o  $V_T$ ?
- 29) Porque o Al deixou de ser usado como material de porta de transistores MOS?
- 30) Qual a motivação para substituir o Si-poli por outro material ou combinação de materiais? Quais são estes materiais alternativos?
- 31) Descreva uma seqüência de processos usados para obtenção de fontes e drenos em CMOS.
- 32) Descreva a motivação do uso e a seqüência de fabricação de estrutura LDD.
- 33) Descreva a motivação do uso e a seqüência de fabricação de estrutura "SALICIDE".
- 34) Quais são os passos básicos envolvidos para o obtenção de contatos e interconexões no circuito integrado?
- 35) Quais as motivações para se usar etapa de planarização do dielétrico?
- 36) Quais são os dielétricos mais usados para isolamento das interconexões?
- 37) Quais são os diferentes graus de planarização definidos?
- 38) Qual a dificuldade em usar vias com paredes inclinadas no caso de superfície (dielétrico) planarizado?
- 39) No caso de usamos superfície planarizada e vias de paredes verticais, como deve se proceder para acessar o nível de metal abaixo?
- 40) Cite e descreva sucintamente 4 processos de planarização dos 8 apresentados. Qual do processo resulta em superfície com planarização completa global?
- 41) Descreva os processos de preenchimento de vias por W por CVD seletivo e por CVD não seletivo?
- 42) Quais são os requisitos para materiais de interconexões?
- 43) Porque o Al é o material preferencial para uso em interconexões?
- 44) Quais as limitações do uso de Al?
- 45) Defina o efeito de eletromigração.
- 46) Quais são remédios usados para combater o efeito de eletromigração em linhas de Al?
- 47) Quais as motivações pelo uso de Cu como linha de interconexão?
- 48) Quais as dificuldades no uso de Cu como linha de interconexão?
- 49) Qual o número máximo de níveis de interconexões usados atualmente na fabricação de CI's?
- 50) Cite as etapas gerais de processos usados na fabricação de CI's.

## Cap.4 Cristalografia

- 4.1 Quais são e defina as 3 formas básicas dos materiais sólidos.
- 4.2 Como podemos descrever uma estrutura cristalina?
- 4.3 O que são as células unitária e primitiva.
- 4.4 Em quantos sistemas e quantas células unitárias podem ser agrupadas todas as redes cristalográficas?
- 4.5 Descreva a estrutura cristalográfica do diamante, Si e Ge ( rede + base ).
- 4.5 Porque é importante saber a estrutura cristalográfica de um material (considere o polimorfismo e direções)?
- 4.6 Como se definem os índices de Miller de um plano?
- 4.7 Como representamos planos e direções de cristais?
- 4.8 Qual a relação geométrica entre planos e direções de mesmos índices de Miller em um cristal cúbico?
- 4.9 Considere o cristal de Si, com parâmetro de rede "a" = 0.543 nm :
  - qual o volume da célula unitária?
  - qual o número de átomos por célula?
  - qual a densidade de átomos por  $\text{cm}^3$ ?
  - qual a densidade do material (massa atômica = 28.09)?
  - qual a densidade de átomos por  $\text{cm}^2$  na superfície de plano (100)?
  - idem para os planos (110) e (111).
  - qual o número de ligações por  $\text{cm}^2$  saindo de cada um destes planos e qual destes seria o plano de clivagem natural?
- 4.10 Qual a técnica usada para determinar a estrutura cristalográfica de um material?
- 4.11 Quais são os tipos de defeitos na classificação geral?
- 4.12 Descreva os defeitos possíveis em cada classe.
- 4.13 Quais os tipos de defeitos inevitáveis e necessários para a fabricação de dispositivos e quais são os indesejáveis e prejudiciais ao desempenho dos mesmos?
- 4.14 O que são EPDs? Porque da importância da sua redução?
- 4.15 Qual a relação entre a máxima solubilidade de um elemento no Si e a formação de precipitados?
- 4.16 Como podemos revelar defeitos? Qual a motivação para fazer isto?
- 4.17 Porque pela revelação de defeitos obtemos um ponto para uma discordância e uma linha para um "stacking fault"?

## Cap. 5 - Obtenção de Cristais de Si.

- 5.1 Quais são as limitações para uso do semicondutor Ge para dispositivos e CI?
- 5.2 Quais as vantagens para se usar o silício ao invés de outros semicondutores?
- 5.3 Quais as vantagens e desvantagens de GaAs?
- 5.4 Quais os passos básicos envolvidos na obtenção de substratos de Si?
- 5.5 Quais os níveis de pureza na classificação grau metalúrgico e grau eletrônico?
- 5.6 Quais os passos envolvidos na obtenção de Si policristalino grau eletrônico?
- 5.7 Descreva o mecanismo de crescimento de um cristal a partir da fusão.
- 5.8 Descreva o processo CZ (Czochralski).
- 5.9 Defina coeficiente de segregação de um elemento entre duas fases e descreva o seu efeito sobre a distribuição de impurezas no tarugo de cristal obtido por processo CZ.
- 5.10 Além dos dopantes intencionais, quais as duas impurezas mais abundantes no cristal de Si obtido por CZ e quais as suas origens?

- 5.11 Quais os efeitos positivos que a grande concentração de oxigênio pode proporcionar? (rigidez mec. + gettering intrínseco).
- 5.12 Descreva o processo FZ ( Floating Zone ) ?
- 5.13 Quais as vantagens e desvantagens do processo FZ comparado ao CZ?
- 5.14 Como podemos dopar o cristal de Si obtido por FZ?
- 5.15 Quantas ordens de grandeza menores são as concentrações de oxigênio e de carbono em material FZ comparado a material CZ e qual o motivo disto?
- 5.16 Sendo a lâmina FZ mais cara que lâmina CZ, para que aplicações ela é importante e porque?
- 5.17 Porque não podemos usar dopagem por radiação de nêutrons em material CZ?
- 5.18 Quais os passos envolvidos na obtenção de lâminas de Si (após a obtenção do tarugo monocristalino)?
- 5.19 Quais seriam as motivações e dificuldades para se trabalhar com lâminas de diâmetro cada vez maior?
- 5.20 Explique porque um iceberg polar não é salgado.
- 5.21 Ao fazermos um puxamento CZ, a partir das seguintes condições:
- massa inicial de Si: 1 Kg
  - massa inicial de P: 1 mg
  - coeficiente de segregação,  $k_0 = 0.35$
  - diâmetro do tarugo: 100 mm
  - densidade do Si:  $2.33 \text{ g/cm}^3$ .
- De quanto será a variação da dopagem desde a semente até o outro extremo?

## Cap. 6 Crescimento Epitaxial

- 6.1 O que significa crescimento epitaxial?
- 6.2 O que diferencia homoepitaxia de heteroepitaxia?
- 6.3 Quais as aplicações de epitaxia para CI's CMOS e bipolares?
- 6.4 Cite aplicações para crescimentos heteroepitaxiais.
- 6.5 O que vem a ser VPE?
- 6.6 Quais são as etapas envolvidas na cinética de processo VPE?
- 6.7 Desenhe o comportamento da taxa de crescimento VPE versus inverso da temperatura. Explique. Indique e explique os dois regimes.
- 6.8 O que significa reação homogênea em VPE? Ela é desejada ou não e porque?
- 6.9 Quais são as etapas envolvidas no processo epitaxial segundo o modelo atomístico?
- 6.10 Qual a relação entre a máxima taxa de crescimento epitaxial e o modelo atomístico de crescimento? Explique.
- 6.11 Quais são os gases precursores usados para o crescimento epitaxial de Si?
- 6.12 Compare os gases usados com temperatura de crescimento e vantagens e desvantagens.
- 6.13 Como introduzimos a dopagem desejada na camada epitaxial?
- 6.14 Descreva os 2 tipos de dopagem não intencional encontrados.
- 6.15 Descreva os efeitos possíveis efeitos de desvio, distorção e desaparecimento de padrões durante o crescimento epitaxial.
- 6.16 Quais são os componentes básicos de um sistema VPE?
- 6.17 O que se entende por crescimento epitaxial seletivo e quais suas vantagens?
- 6.18 Descreva a técnica MBE.

## Cap. 7 Oxidação de Si

- 7.1 Quais as necessidades ou aplicações de filmes de  $\text{SiO}_2$  em tecnologia MOS?
- 7.2 Quais são as técnicas de obtenção de filmes de  $\text{SiO}_2$  e quais entre estas são as duas mais usadas?
- 7.3 Como é realizado o processo de oxidação térmica? Qual a relação entre a espessura do Si consumido e do óxido crescido?
- 7.4 Cite os três fluxos de espécies oxidantes propostos no modelo de Deal-Grove? Faça o desenho esquemático.
- 7.5 Qual a equação resultante do modelo de Deal-Grove?
- 7.6 Quais os dois regimes limites previsto pelo modelo Deal-Grove? Como fica simplificado a equação do modelo nos 2 casos?
- 7.7 Em que instantes da oxidação estamos em cada um destes regimes.
- 7.8 Compare as constantes B e B/A nas oxidações seca e úmida. Explique porque uma delas é a maior.
- 7.9 Porque a energia de ativação da constante B é diferente para oxidação seca e úmida?
- 7.10 Porque a energia de ativação da constante B/A é a mesma para oxidação seca e úmida?
- 7.11 Qual a limitação maior do modelo Deal-Grove?
- 7.12 Que fatores afetam a constante parabólica B, ou seja, D e  $C^*$  ?
- 7.13 Que fatores afetam a constante linear B/A, ou seja, k e  $C^*$  ?
- 7.14 Interprete as figuras da página (228)
- 7.15 O que significa coeficiente de segregação?
- 7.16 Como pode o coeficiente de segregação afetar a redistribuição de dopantes no Si durante a sua oxidação?
- 7.17 Interprete as duas curvas da página (230). Ou seja: a) no gráfico  $t_{\text{ox}}$  X tempo de oxidação, parametrizado com temperatura de oxidação e com o nível de dopagem de Boro do substrato ( $1\text{E}16$ ,  $1\text{E}20$  e  $2.5\text{E}20 \text{ cm}^{-3}$ ) observa-se sempre uma distinção entre as curvas, enquanto que b) no gráfico  $t_{\text{ox}}$  X tempo de oxidação, parametrizado com temperatura de oxidação e com o nível de dopagem de Fósforo do substrato ( $4\text{E}16$ ,  $3.7\text{E}19$  e  $1.5\text{E}20 \text{ cm}^{-3}$ ) observa-se uma distinção entre as curvas para  $T = 920^\circ\text{C}$ , uma pequena distinção entre as curvas para  $T = 1000^\circ\text{C}$  e nenhuma distinção entre as curvas para  $T = 1100^\circ\text{C}$  e  $1200^\circ\text{C}$  ?
- 7.18 Existe alguma diferença entre oxidação seca de  $\text{O}_2$  ou em  $\text{O}_2$  com uma fração de por exemplo 25 ppm de  $\text{H}_2\text{O}$  ?
- 7.19 Quais os efeitos da adição de fração de gás clorado ao ambiente oxidante de  $\text{O}_2$ ?
- 7.20 Explique o modelo de crescimento de falhas de empilhamento (FS) durante uma oxidação e porque seu crescimento é menor em ambiente contendo cloro?
- 7.21 Baseado em que parâmetros, nós podemos projetar a espessura mínima de camada de  $\text{SiO}_2$  necessário para mascarar uma dada etapa de difusão?
- 7.22 Descreva os 4 tipos de cargas existentes no sistema  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .
- 7.23 Que cuidados ou ações devem ser tomadas para reduzirmos cada um dos quatro tipos de cargas?
- 7.24 Descreva os diferentes sistemas de oxidação (seca, úmida, vapor, pirogênica, alta pressão, RTO).

## Cap. 8 Difusão de dopantes em Si

- 8.1 Defina o processo de difusão.
- 8.2 Quais são os possíveis tipos de fontes de dopantes?
- 8.3 Descreva os dois mecanismos de difusão?

- 8.4 Qual a força motriz básica para a difusão?
- 8.5 Quais as duas leis de Fick?
- 8.6 Porque o coeficiente de difusão aumenta exponencialmente com a temperatura?
- 8.7 Qual o significado físico da energia de ativação de processo de difusão? Porque seu valor é maior no caso de difusão substitucional comparado ao intersticial?
- 8.9 Desenhe um gráfico tipo Arrhenius de coeficiente de difusão de impurezas tipo Cu e tipo B, em Si. Explique as curvas.
- 8.10 Como e porque o coeficiente de difusão D pode ser desmembrado em componentes?
- 8.11 Qual a diferença entre coeficiente de difusão intrínseca e extrínseca?
- 8.12 Como os componentes do coeficiente de difusão variam com a concentração de portadores (ou nível de Fermi) em material extrínseco?
- 8.13 Que evidências experimentais sugerem que, além das componentes do coeficiente de difusão associados ao nível de carga do D.P., podemos separar o coeficiente em componentes associados ao D.P. tipo vacância e tipo auto-intersticial?
- 8.14 Campo elétrico interno pode alterar o coeficiente de difusão? Quanto?
- 8.15 Como devemos proceder para calcular o perfil de dopagem após uma dada difusão? Ou melhor, como você acha que os programas de simulação procedem?
- 8.16 Qual o tipo de solução analítica para uma difusão a partir de uma fonte gasosa constante?
- 8.17 Qual o tipo de solução analítica para uma difusão a partir de uma camada superficial rasa e finita?
- 8.18 Como medimos a resistência de folha após uma difusão? Porque ele serve como uma medida de controle da difusão? O que ela indica?
- 8.19 Descreva um dos métodos para medir a profundidade de junção?
- 8.20 Cite os 3 métodos descritos em aula para medir um perfil de dopagem.

### Cap.9 Implantação Iônica

- 9.1 Cite as características da técnica de implantação de íons.
- 9.2 Quais as vantagens e desvantagens da técnica de implantação de íons comparado à difusão térmica?
- 9.3 Explique como funciona um seletor de massa de implantador de íons.
- 9.4 Como funciona uma fonte de íons e qual é a velocidade com que os íons deixam o extrator da fonte?
- 9.5 Qual a função das seguintes unidades do implantador: a) tubo de aceleração, sistema de varredura X e Y, sistema de vácuo?
- 9.6 Como medimos a quantidade de dopantes introduzidos na amostra?
- 9.7 Porque os íons perdem velocidade no material e do que depende a profundidade média alcançada pelos mesmos?
- 9.8 Cite e explique os dois mecanismos de frenagem dos íons implantados?
- 9.9 Como variam as taxas de frenagem eletrônico e nuclear com energia (curvas esquemáticas)?
- 9.10 Porque o modelo do potencial eletrostático é tão importante para o cálculo da frenagem nuclear?
- 9.11 Defina o fenômeno de canalização na implantação de íons em materiais cristalinos.
- 9.12 Como variam as taxas de frenagem nuclear e eletrônico quando o íon for canalizado?
- 9.13 Compare as taxas de frenagem para os íons de  $^{11}\text{B}^+$ ,  $^{31}\text{P}^+$  e  $^{75}\text{As}^+$  em Si.

- 9.14 Como varia o nível de complexidade e de precisão entre as distribuições tipo Gaussiana de 2 momentos, de 3 momentos e de 4 momentos?
- 9.15 A que estão associados os termos das distribuições chamados de “skewness” e “kurtosis”?
- 9.16 Quais as limitações do uso das distribuições de 2 a 4 momentos comparado ao uso de cálculo de perfil por método de Monte Carlo?
- 9.17 Como podemos evitar ou reduzir o efeito de canalização de íons num cristal durante a implantação de íons?
- 9.18 Quais são os parâmetros a escolher numa implantação iônica, desejando-se um dado perfil de portadores e de defeitos residuais?
- 9.19 Qual a quantia de energia que deve ser transferida numa colisão para que o átomo de Si seja deslocado da posição de rede?
- 9.20 Que tipos de defeitos são formados durante a etapa de implantação iônica?
- 9.21 Qual a diferença entre uma cascata de defeito produzido por íon de B e de As? Associe isto com os valores dos caminhos livres médios dos dois íons.
- 9.22 O que significa recozimento dinâmico durante implantação iônica e quais as suas dependências?
- 9.23 Descreva os dois modelos de amorfização durante etapa de implantação iônica.
- 9.24 Como o recozimento dinâmico afeta a dose crítica de amorfização?
- 9.25 Como os efeitos de defeitos pontuais gerados pela I/I se comportam durante um recozimento térmico?
- 9.26 A partir de que temperatura inicia-se o SPEG (crescimento epitaxial em fase sólida) em Si e qual sua dependência com os parâmetros da lâmina (orientação e impurezas)?
- 9.27 Quais são os tipos de defeitos que podem ficar remanescentes após recozimento de Si implantado (5 categorias)?
- 9.28 Qual a explicação do recozimento reverso observado no caso da I/I de B para doses maiores que  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ? Porque este fenômeno normalmente não é observado no caso de I/I de P?
- 9.29 Quais os motivos da maior dificuldade em obter junção rasa tipo p comparado ao tipo n?
- 9.30 Cite soluções para suprir os problemas associados à obtenção de junção rasa tipo p?
- 9.31 Que recozimentos térmicos são usualmente empregados após uma I/I em GaAs?
- 9.32 Qual é a dificuldade em se recozer GaAs e quais as soluções para evitar o problema?
- 9.33 Quais são os dopantes (2) tipo n mais apropriados para GaAs? Entre estes 2 qual o melhor?
- 9.34 Qual a motivação do uso do radical  $\text{SiF}^+$  para implantar Si? Quais suas desvantagens?
- 9.35 Quais os possíveis problemas em se usar uma capa de  $\text{SiN}_x$  para o recozimento pós implantação?
- 9.36 Quais são os dopantes (2) tipo p mais apropriados para GaAs? Entre estes 2 qual é o melhor?
- 9.37 Quais as vantagens e desvantagens de se implantar elemento da coluna V juntamente com o dopante tipo p?

## Cap 10. Física de Plasma

- 10.1 Defina um plasma.
- 10.2 Como se produz um plasma?
- 10.3 Qual a relação entre a temperatura (energia) dos elétrons e íons numa descarga luminosa?
- 10.4 Que espécies são produzidos num plasma e qual a fração de espécies carregadas?
- 10.5 Quais as aplicações de plasma ou descarga luminosa em microeletrônica?
- 10.6 Como varia o caminho livre médio de partículas e o coeficiente de difusão num gás com a pressão?
- 10.7 Qual a fórmula de fluxo de partículas de um gás sobre uma superfície?
- 10.8 Como varia a energia e a velocidade média de moléculas num gás com a temperatura?
- 10.9 Qual a forma de energia recebida por uma partícula num espalhamento inelástico?
- 10.10 Quais os tipos de processos que podem ocorrer em colisões inelásticas?
- 10.11 Como varia a taxa de reação entre espécies químicas com a temperatura e como a geração de plasma afeta o comportamento?
- 10.12 Defina a bainha de um plasma e explique porque o potencial de plasma é sempre superior ao de qualquer superfície no plasma.
- 10.13 Desenhe a distribuição de potencial em uma descarga DC e explique-a.
- 10.14 Como são gerados ou repostos os elétrons que são perdidos nas paredes e eletrodos, para que o plasma seja mantido ou não se extingue?
- 10.15 Como varia a densidade de corrente de íons através da bainha com a tensão sobre a mesma e a largura da mesma?
- 10.16 Quais as características da região luminosa (densidade de carga e potencial)?
- 10.17 Qual a motivação básica para usar plasma tipo AC ao invés de DC.
- 10.18 Explique o fenômeno de auto-polarização em plasma tipo RF com um capacitor em série.
- 10.19 Quais os efeitos da auto-polarização do plasma?
- 10.20 Qual a relação da tenção DC induzida no catodo e as áreas dos eletrodos?
- 10.21 Porque em sistemas RIE e sputtering, usamos área de catodo muito menor que o das paredes (anodo)?
- 10.22 Quais as limitações de sistema de plasma com acoplamento RF capacitivo?
- 10.23 Explique a ressonância ciclotrônica de elétrons como usado na geração de plasma ECR.
- 10.24 Quais as vantagens de uso de sistema de plasma tipo ECR?
- 10.25 Explique o sistema de plasma tipo ICP.

## **Cap. 11 Deposição Química por Fase Vapor - CVD**

- 11.1 Defina o processo CVD.
- 11.2 Cite filmes que finos que podem ser obtidos por CVD
- 11.3 Quais são os requisitos para uma técnica de deposição de filmes finos.
- 11.4 Quais são os passos envolvidos na cinética de deposição de filmes por CVD e quais são as duas classes em que estes passos podem ser agrupados?
- 11.5 Descreva a curva típica de taxa de deposição de filme por CVD versus inverso de temperatura. Indique os dois regimes de processo.
- 11.6 Quais as vantagens de processo LPCVD versus APCVD?
- 11.7 Qual a principal motivação para o uso de processo PECVD e quais as suas vantagens e desvantagens?
- 11.8 Idem para RPECVD.

- 11.9 Quais os gases (mais importantes) usados na deposição de  $\text{SiO}_2$ ?
- 11.10 Idem para  $\text{SiN}_x$ ?
- 11.11 Idem para Si policristalino.
- 11.12 Quais as principais aplicações de filmes isolantes de óxido de silício e de nitreto de silício? Quando há preferência por um ou outro?
- 11.13 Quais são os parâmetros de processo a serem ajustados no estudo de otimização de deposição de filmes finos por PECVD e quais as características a serem analisadas nesta tarefa?
- 11.14 Que informações oferece a técnica de elipsometria e a de FTIR? Qual o princípio de funcionamento desta última?
- 11.15 Quais os possíveis problemas associados à incorporação de grande quantidade de hidrogênio em filmes de nitreto de silício? Compare sua concentração em filmes obtidos por CVD térmico, por PECVD clássico e por RPECVD (tipo ECR)?
- 11.16 Porque a incorporação de hidrogênio em filme de nitreto de silício é relativamente bem mais baixo na deposição por CVD tipo ECR? (uso de fonte de  $\text{N}_2$  e introdução da silano abaixo da região de plasma)
- 11.17 Porque o índice de refração aumenta com a fração de fluxo de silano (Fig.3, p.11.30)

## **Cap. 12 Corrosão (decapagem) por Plasma - "Plasma Etching"**

- 12.1 Quais as motivações para uso de decapagem assistido por plasma?
- 12.2 Quais são as características a serem avaliadas em decapagem assistido por plasma?
- 12.3 Quais são as características de um processo de decapagem seca desejadas em diferentes aplicações?
- 12.4 Quais são os parâmetros de processos em processo de corrosão por plasma?
- 12.5 Cite os tipos de equipamentos de decapagem seca.
- 12.6 Quais as características de um "barrel etcher" e quais as suas aplicações mais importantes?
- 12.7 Porque o controle e uniformidade da temperatura, durante corrosão por plasma, são importantes? Porque a temperatura aumenta e como ela pode ser controlada?
- 12.8 Quais as características de um sistema RIE e quais as suas aplicações?
- 12.9 Porque os íons alcançam a superfície verticalmente em sistema RIE?
- 12.10 O que é favorecido pelo uso de pressão baixa e alta potência (campo de aceleração) em processo RIE e quais os malefícios associados?
- 12.11 Quais as vantagens associadas ao sistema de reator tipo triodo?
- 12.12 Quais as motivações de uso de sistemas tipo "Down Stream Etchers" e tipo ECR?
- 12.13 Qual a motivação de uso de detecção de ponto final?
- 12.14 Explique o funcionamento do sistema de interferometria para detectar o ponto final de decapagem.
- 12.15 Idem para sistema de emissão óptica do plasma.
- 12.16 Quais são os passos envolvidos na cinética de decapagem assistido por plasma?
- 12.17 Quais os efeitos de sputtering sobre os processos de reação de superfície?
- 12.18 Como varia a taxa de geração de  $[\text{O}]$  com a pressão de  $\text{O}_2$  e a potência RF?
- 12.19 Qual é a espécie/radical dominante em plasmas de gases fluorados e que é responsável pelas reações com materiais como Si,  $\text{SiO}_2$ , outros?
- 12.20 Qual o efeito de uso de gases fluorados com maior razão de C/F na sua composição?

- 12.21 Qual o efeito da adição de  $H_2$  a gases fluorados?
- 12.22 Idem, para adição de  $O_2$ ?
- 12.23 Qual o efeito da polarização do substrato sobre a deposição de polímero na superfície? Como a engenharia pode usar esta dependência?
- 12.24 O que é o efeito de "microscopic loading"? Quais são as possíveis causas?
- 12.25 Em que situação a taxa de corrosão apresenta uma dependência tipo Arrhenius? Explique o motivo desta dependência e qual a sua consequência?
- 12.26 O que vem a ser cinética química acelerada por íon?
- 12.26 Porque a energia média dos íons aumenta com a redução da frequência RF?
- 12.27 Como devemos variar a pressão e/ou potência para aumentar a anisotropia?
- 12.28 Quais os gases usados para decapagem de materiais orgânicos?
- 12.29 Quais os gases mais usados para corrosão de Si,  $SiO_2$  e  $Si_3N_4$ ?
- 12.29 Qual a etapa limitante na decapagem de GaAs por plasma de gases clorados?
- 12.30 Quais os problemas ou cuidados a serem tomados na decapagem de GaAs por gás contendo  $CH_4$ ?

### Cap.13 PVD - Physical Vapor Deposition

- 13.1 Quais as funções de metais em Cl's? Qual o metal mais usado atualmente e porque? Porque se está procurando substituí-lo por outro metal e qual é este novo material?
- 13.2 Defina processo PVD. Quais são as etapas envolvidas?
- 13.3 Quais são os processos classificados como PVD?
- 13.4 Defina o processo de "sputtering".
- 13.5 Como escolhemos entre sputtering DC e RF?
- 13.6 Quais as vantagens e desvantagens de sputtering?
- 13.7 Quais os fenômenos que podem ocorrer na interação entre íons e superfície? Qual a faixa de energia do íon incidente para que o fenômeno de sputtering seja predominante?
- 13.8 Como varia o rendimento de sputtering com a energia e com a massa do íon incidente? E com o ângulo de incidência?
- 13.9 Qual a natureza e a energia típica dos átomos desalojados?
- 13.10 Descreva e justifique a escolha de parâmetros de processo de sputtering: tensão  $V_{DC}$ , tipo de gás, pressão.
- 13.11 Além de deposição de filmes finos, que outras aplicações temos para sputtering?
- 13.12 Quais são as espécies que alcançam os substratos durante o sputtering? Qual o efeito de cada uma?
- 13.13 Qual o efeito da incorporação de oxigênio nos filmes? Quais as possíveis fontes de oxigênio?
- 13.14 Qual a motivação do uso de sputtering com polarização dos substratos?
- 13.15 Quais os fatores que determinam se a estequiometria do filme é o mesmo ou diferente ao do alvo no caso deste ser a) uma liga, b) um composto?
- 13.16 Como podemos conseguir um filme tipo  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $WN_x$ ,  $AlN_x$  a partir de sputtering de alvos de um material puro?
- 13.17 Qual a motivação para o uso de sputtering tipo magnetron? Descreva a técnica.
- 13.18 Quais são as características gerais desejadas de processo de sputtering de filmes finos?
- 13.19 Quais os efeitos do aquecimento da lâmina durante a deposição de filme por sputtering?

- 13.20 Como podemos melhorar a cobertura de degrau do filme depositado por sputtering?
- 13.21 Qual a dificuldade em depositar filmes de metais refratários por processos de evaporação térmica?
- 13.22 Quais são as vantagens e desvantagens da técnica de evaporação térmica?
- 13.23 Porque a fonte de evaporação não pode ser considerada como pontual? Como podemos melhorar a uniformidade de deposição?
- 13.24 Descreva três métodos de evaporação mais simples (menos caros).
- 13.25 Descreva dois métodos de evaporação mais sofisticados e mais caros.

## **Cap.14 Fotogravação**

- 14.1 A etapa de fotogravação representa quantos porcentos aproximadamente do tempo de fabricação e do custo de fabricação de CI's?
- 14.2 Defina a etapa de fotogravação.
- 14.3 Quais são as etapas básicas envolvidas na fotogravação?
- 14.4 Qual a diferença básica entre fotorresiste positivo e negativo?
- 14.5 Quais os 3 componentes básicos de um fotorresiste e quais as funções de cada um?
- 14.6 Defina resolução de processo de fotogravação? Do que ela depende?
- 14.7 Defina contraste de um fotorresiste.
- 14.8 Defina inchamento de fotorresiste. Qual a consequência do fenômeno?
- 14.9 Que efeitos podem ocorrer pela falta de aderência do fotorresiste à superfície?
- 14.10 Como podemos melhorar a aderência do fotorresiste?
- 14.11 Quais as vantagens e desvantagens entre o fotorresiste positivo e negativo?
- 14.12 Quais as motivações do uso de processo de multicamadas de resiste? Descreva um processo.
- 14.13 Descreva o processo "DESIRE" de fotogravação. Quais suas vantagens?
- 14.14 Como se aplica fotorresiste à lâmina? Quais são os 2 parâmetros do processo que devem ser ajustados para se obter uma desejada espessura de fotorresiste?
- 14.15 Qual a função da etapa de cura suave ou "soft-bake" do fotorresiste? Como ela é realizada normalmente?
- 14.16 Como é realizada a etapa de exposição e quais são os parâmetros a serem ajustados?
- 14.17 Descreva o fenômeno de ondas estacionárias na fotogravação e quais os seus efeitos?
- 14.18 Quais os requisitos para a etapa de revelação?
- 14.19 Que substâncias são usadas como revelador e quais as variáveis do processo?
- 14.20 Como é realizada a etapa de descum e qual a sua função?
- 14.21 Qual a função da etapa de cura posterior, ou "hard-bake"?
- 14.22 Quais as características importantes de uma alinhadora óptica?
- 14.23 O que vem a ser difração da luz e como ela afeta a resolução?
- 14.24 O que é coerência espacial? Como deve ser a coerência espacial para aumentarmos o MTF (Modulation Transfer Function)?
- 14.25 O que vem a ser Abertura Numérica (NA) de um lente? É mais barato ou simples obter lente com NA alto ou baixo?
- 14.26 Defina resolução matematicamente. Ou seja, como devemos variar  $\lambda$  e NA para aumentarmos a resolução?
- 14.27 Defina profundidade de foco. Como  $\lambda$  e NA afetam a profundidade de foco?

- 14.28 Existe um conflito entre resolução e profundidade de foco? Como resolver este conflito?
- 14.29 Qual a tendência de evolução dos seguintes parâmetros de fotogração:  $\lambda$  (comprimento de onda), NA (abertura numérica),  $\gamma$  (contraste) e S (coerência espacial) ? Qual o efeito desta evolução sobre a resolução e sobre a profundidade de foco?
- 14.30 Quais os componentes de uma alinhadora óptica?
- 14.31 Descreva os três métodos de transferência de imagem óptica.
- 14.32 No caso do método de projeção, quais os tipos de sistemas?
- 14.33 Compare os métodos de impressão por contato e por proximidade.
- 14.34 Quais as características de um sistema “step and repeat” com redução?
- 14.35 Quais são as fontes de radiação usadas e quais os comprimentos de ondas características?
- 14.36 Quais as vantagens e desvantagens de litografia por Raio X?
- 14.37 Quais as vantagens e desvantagens de litografia por feixe de elétrons?
- 14.38 A produção de CI's até hoje é essencialmente feita por litografia óptica? Até que geração de CI's ela continuará sendo essencialmente óptica? Quais são as várias opções para as gerações tecnológicas posteriores?