

Capítulo 11 – Deposição de Filmes Finos por CVD – Pt I

Ioshiaki Doi
FEEC e CCS/UNICAMP

Capítulo 11 – Deposição de Filmes Finos por CVD

11.1. Introdução

11.2. Conceitos Básicos de CVD

- Processo CVD
- Crescimento de Filmes
- Cinética de CVD

11.3. Tipos de Reatores

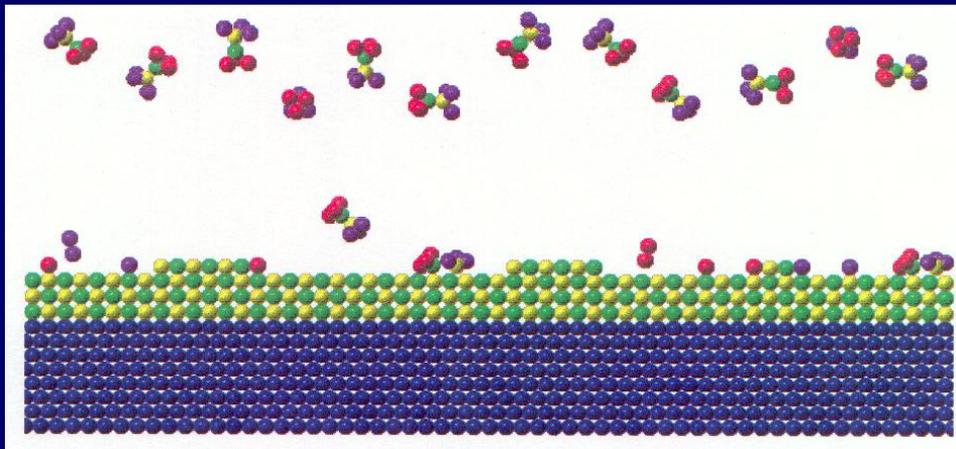
- LPCVD
- APCVD
- PECVD

11.4. Processos de Deposição de Dielétricos e Si-poli

- Si-poli
- Óxido de Silício
- Nitreto de Silício

11.1. Introdução

- Deposição Química a partir de Fase Vapor (Chemical Vapor Deposition – CVD)



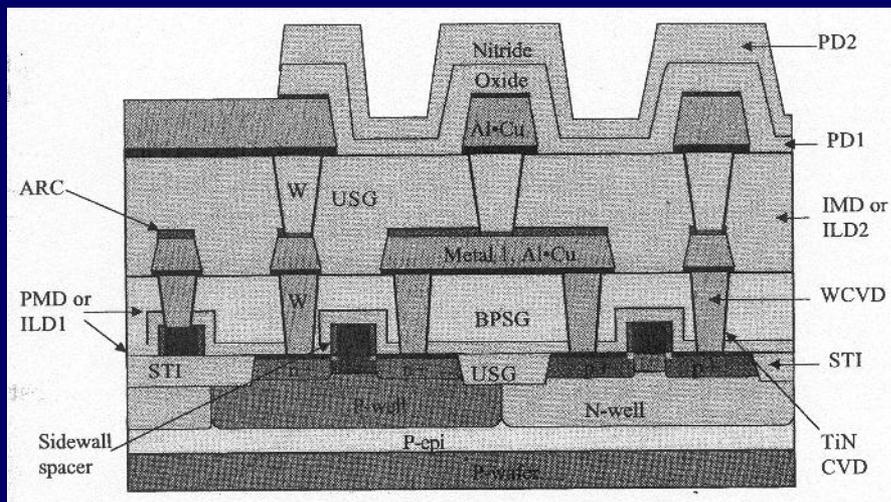
- CVD: reações químicas que transformam moléculas gasosas  chamada precursor, em material sólido  na forma de filmes, sobre o substrato  .

- CVD

- Método mais comum de deposição de filmes finos, utilizados atualmente na fabricação de CIs.
- Deposição de filmes finos isolantes (dielétricos), condutores e semicondutores.

- **Aplicações dos Filmes Finos:**
 - Conexão das regiões ativas dos dispositivos.
 - Comunicação entre os dispositivos.
 - Acesso externo aos circuitos.
 - Isolação entre as camadas condutoras.
 - como fonte de dopante e como barreira para dopagem.
 - para proteger as superfícies do ambiente externo.

- Variados Tipos de Filmes Finos Utilizados na Fabricação de CIs.



PD – passivation dielectric

ILD – interlayer dielectric

IMD – intermetal dielectric

PMD – premetal dielectric

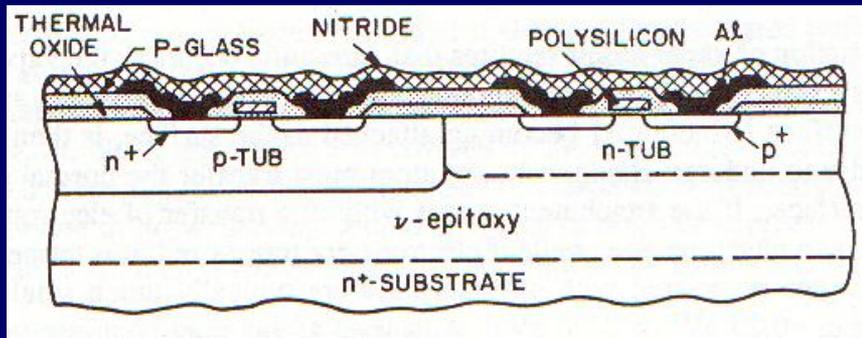
USG – undoped silicate glass

BPSG – borophosphosilicate glass

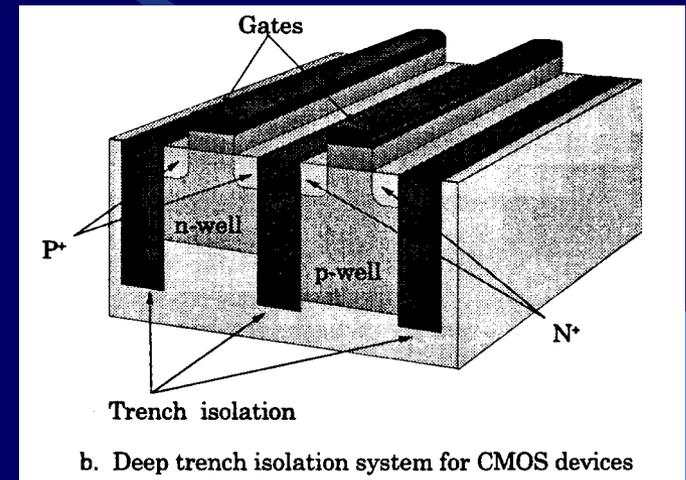
ARC – antireflection coating

Aplicação de filmes finos dielétricos em circuitos CMOS.

- Outros Exemplos:



Nitretos e si-poli



Dielétrico para isolamento de 2 dispositivos

- Alguns filmes são usados temporariamente como camada de máscara, enquanto que outros filmes tornam partes do circuito sendo fabricado.

• Filmes que podem ser depositados por CVD:

- silício policristalino (Si-poli)
- óxido de silício (SiO_2)
- nitreto de silício (Si_3N_4 , SiN)
- metais (Al, W, Ti, etc.)
- silicetos (WSi_2 , TiSi_2 , MoSi_2 , TaSi_2)

- **Requisitos Necessários para a Técnica de Deposição de Filmes Finos :**
 - a) – alta pureza e densidade;
 - b) – composição e estequiometria controladas;
 - c) – boa uniformidade em espessura e reprodutibilidade;
 - d) – alto nível de perfeição estrutural;
 - e) – boas propriedades elétricas;
 - f) – excelente aderência;
 - g) – boa cobertura de degraus;
 - h) – baixa densidade de defeitos(imperfeições, pinholes, etc.);
 - i) – baixa contaminação por partículas, e
 - j) – processo econômico:
 - alta taxa de produção,
 - seguro, automatizável e barato.

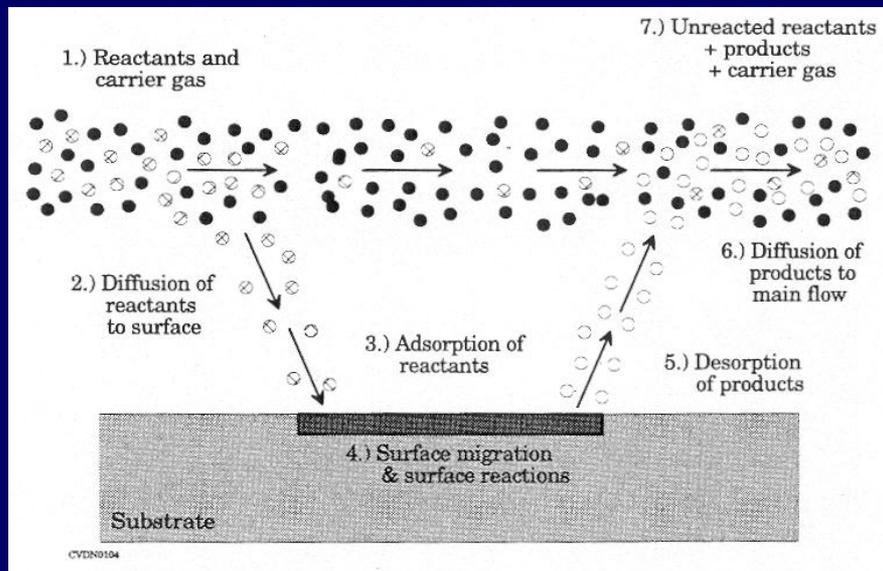
- A técnica CVD atende vários dos requisitos citados, com vantagens sobre outras técnicas.

11.2. Conceitos Básicos de CVD

- Processo CVD

- **CVD:** formação de um filme sólido sobre um substrato pela reação de espécies químicas em fase vapor.

• Formação do filme CVD



• Descrição da cinética do processo CVD:

- 1) – introdução na câmara dos gases reagentes e diluentes a dada composição e fluxo;
- 2) – transporte/movimento das espécies reativas até o substrato;
- 3) – adsorção das espécies reativas na superfície do substrato;
- 4) – migração das espécies na superfície e reações químicas de formação do filme;
- 5) – dessorção dos subprodutos da reação;
- 6) – transporte dos subprodutos da reação para a região de fluxo principal; e
- 7) – remoção dos subprodutos gasosos da reação e gases não consumidos no processo, da câmara de reação.

• Tipos de Reações Químicas ou Processos :

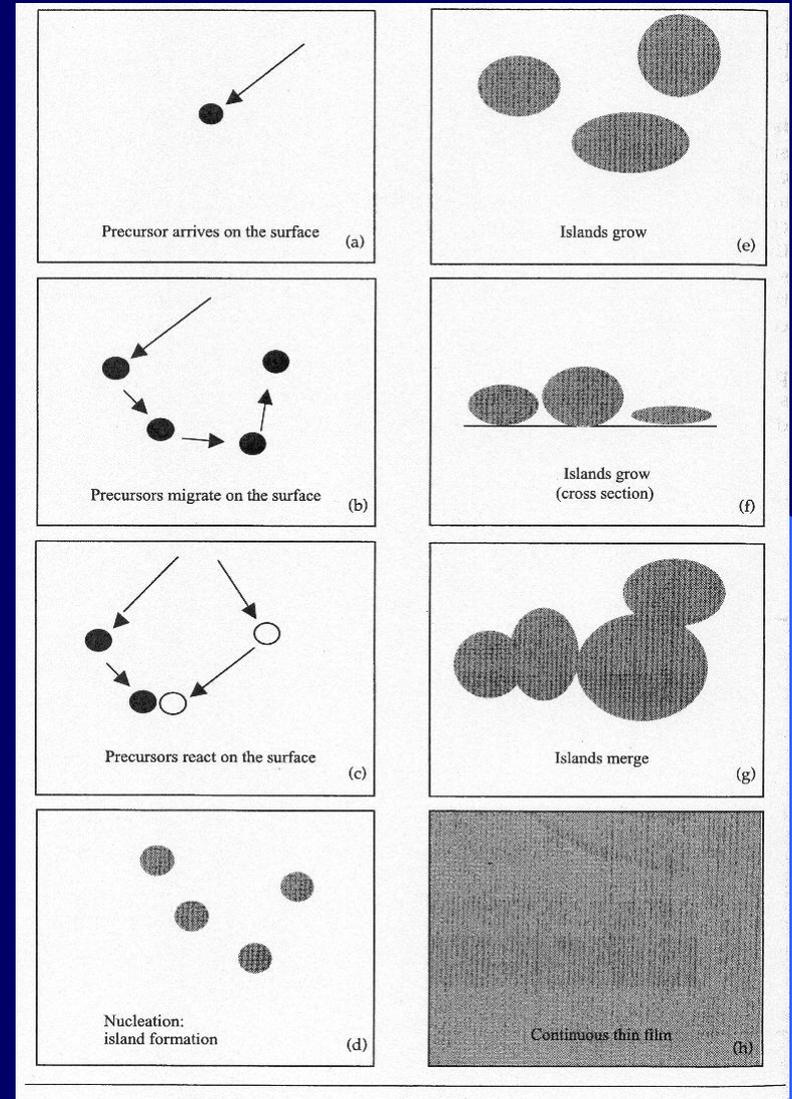
- **Reação homogênea** – reação na fase vapor (**Processos de Fase Vapor**). Produz partículas \Rightarrow resulta em filmes de pouca aderência, baixa densidade e alta concentração de defeitos.
- **Reação heterogênea** – reação na superfície ou próxima dela. Processo desejável (**Processos de Superfície**).

• Energia para propiciar a reação:

- térmica
- fótons e
- elétrons.

• Processos de Deposição CVD

- Nucleação
- Formação de Ilhas
- Crescimento das ilhas
- Coalescência
- Formação de filme contínuo



- **Estrutura dos Filmes**

- tamanho dos grãos – depende das condições de deposição e dos tratamentos térmicos posteriores. Grãos maiores – temperaturas maiores de processamento e filmes mais espessos.
- rugosidade está relacionada com o tamanho dos grãos.

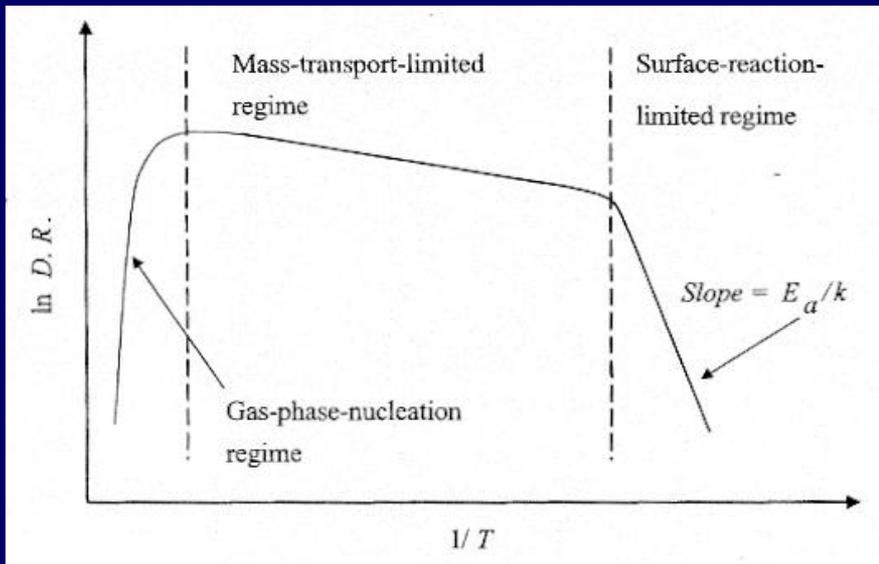
- **Reação na Superfície – Taxa de Reação Química**

$$CR = A \exp(-E_a/kT)$$

onde: CR é a taxa de reação, A é uma constante, E_a é a energia de ativação em eV, k é a constante de Boltzman e T é a temperatura do substrato em °K.

- Processo CVD: A taxa de deposição (DR) está relacionada com a taxa de reação química (CR), taxa de difusão do precursor no “boundary layer” e taxa de adsorção do precursor sobre a superfície.

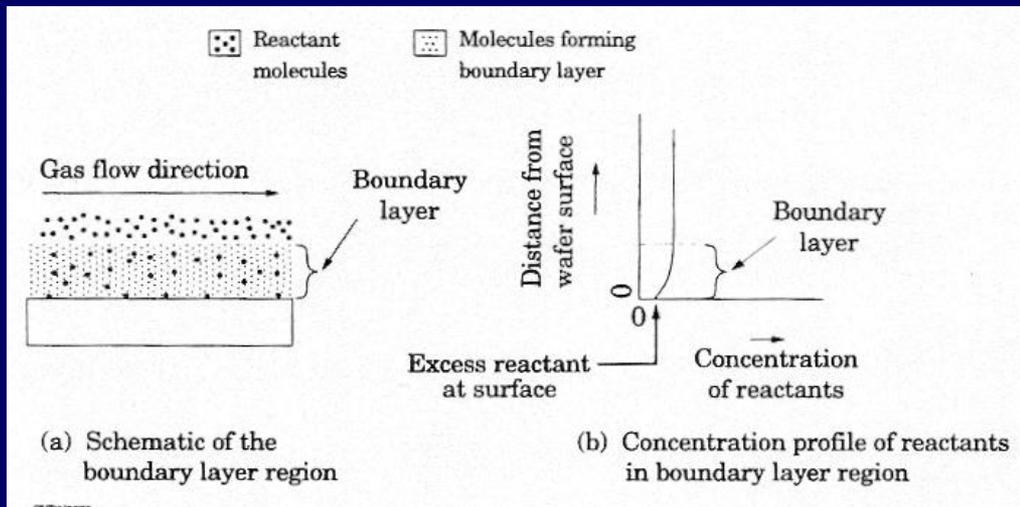
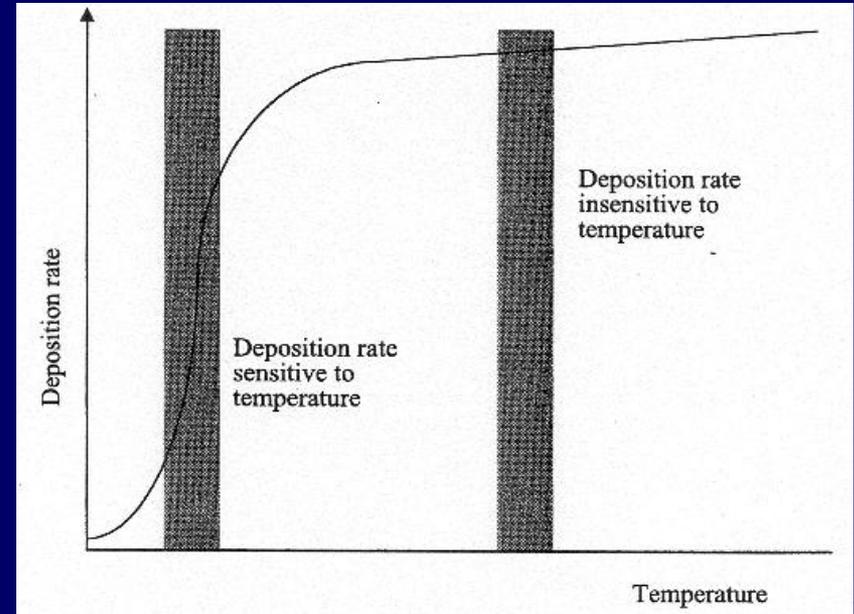
• Regimes de Deposição



- Há 3 regimes:
 - a) - Baixas temperaturas – a taxa de reação química é baixa e a taxa de deposição bastante sensível a temperatura. \Rightarrow regime limitado por reação de superfície.
 - b) - temperaturas altas – deposição bem menos sensível à temperatura. \Rightarrow regime limitado por transporte de massa.
 - c) - Se aumentarmos mais a temperatura, a taxa decresce rapidamente devida a nucleação na fase gasosa. \Rightarrow processo indesejável.

- **Regime limitado por reação:**

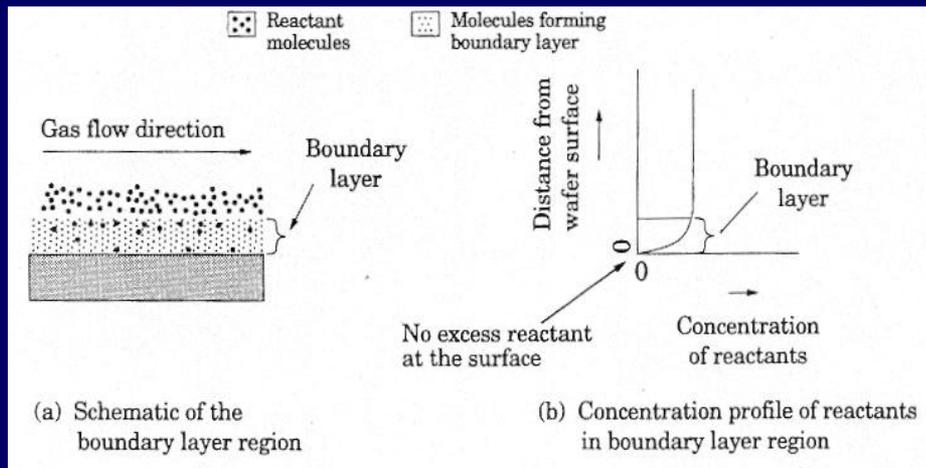
Taxa de deposição bastante sensível a temperatura porque é determinado principalmente pela taxa de reação química. Requer boa uniformidade de temperatura sobre o substrato.



Temperaturas baixas \Rightarrow somente poucas moléculas possuem energia suficiente para iniciar a reação.

- **Regime limitado por transporte de massa:**

A taxa de reação química é suficientemente alta e os precursores reagem imediatamente quando adsorvidos sobre a superfície do substrato. Taxa de deposição não depende da taxa de reação de superfície, mas pela rapidez com que os precursores podem difundir através do “boundary layer” e adsorvido sobre a superfície. ⇒Requer boa uniformidade de fluxo e de densidade de espécies sobre as lâminas.

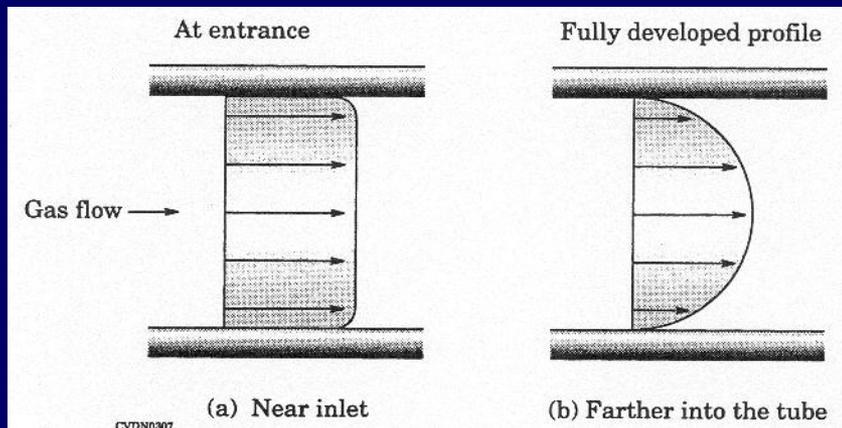


Difusão através do “boundary layer” na superfície do substrato.

Ao alcançar determinada temperatura, a taxa de reação torna-se controlada por taxa de reagentes que chegam a superfície do substrato.

- Dinâmica dos Fluidos no Reator

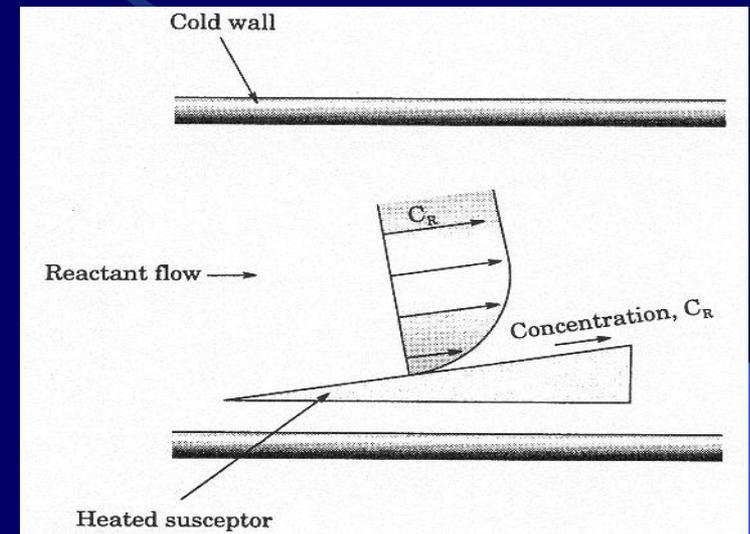
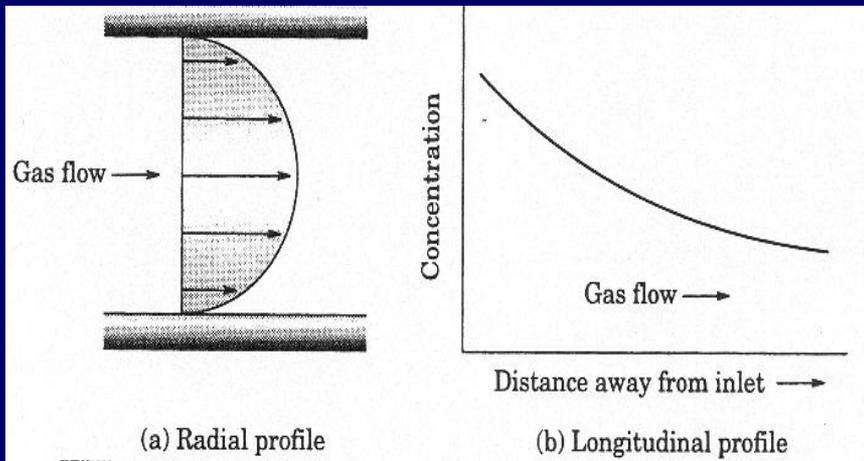
- Comportamento da Velocidade dos fluídos



Velocidade do fluído na superfície do reator é zero. Aumenta a medida que se distancia da parede. Há uma certa distância da entrada do gás, apresenta um perfil parabólico.

Perfil de velocidade – reator tubular

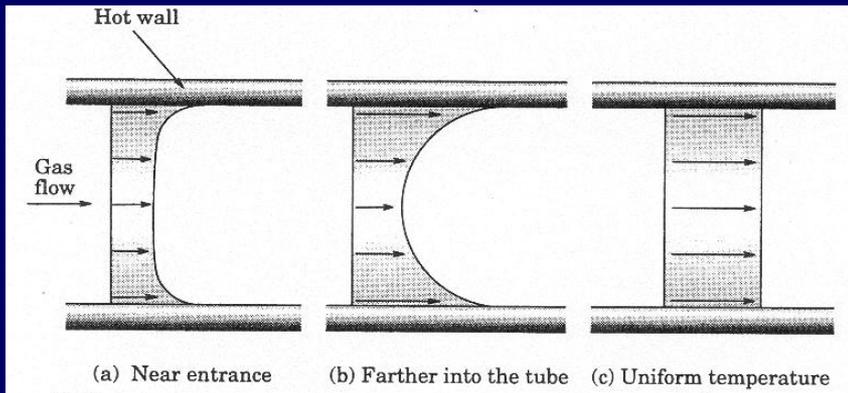
- Concentração dos gases reagentes.



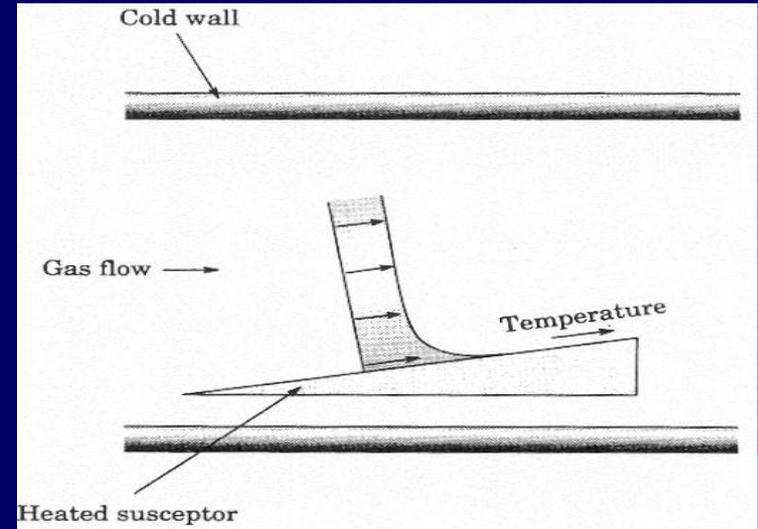
Concentração dos reagentes num reator de paredes quentes.

Concentração dos reagentes num reator de paredes frias. Zero na superfície do susceptor e aumenta rapidamente com distância da superfície.

- Perfil de temperatura

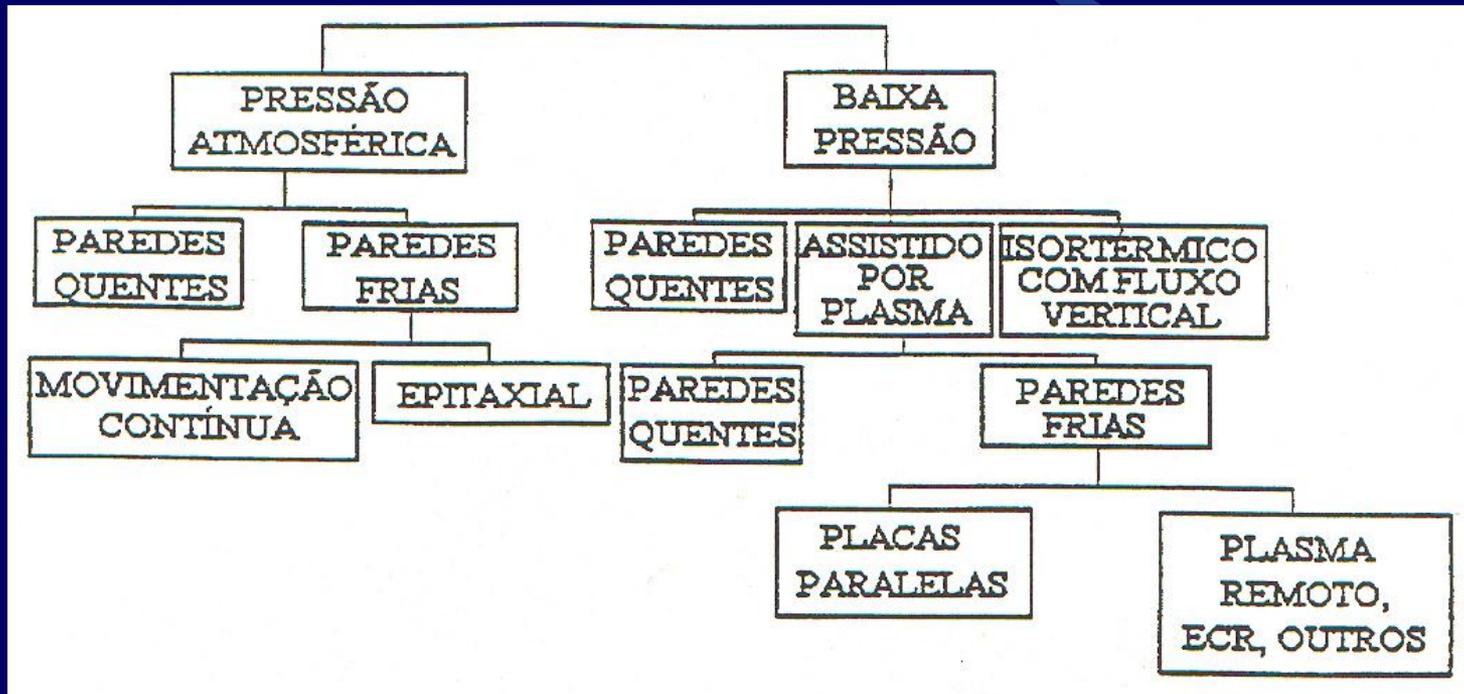


Reator de paredes quentes: na entrada somente os gases próximos a parede são aquecidas. Pouco adiante, gases próximos do centro são aquecidos. Se o reator for longo, em algum ponto o gás é aquecido uniformemente.



Reator de paredes frias : a temperatura do gás é mais alto na superfície do susceptor e decresce rapidamente para um valor constante, a uma certa distância da superfície.

11.3. Tipos de Reatores

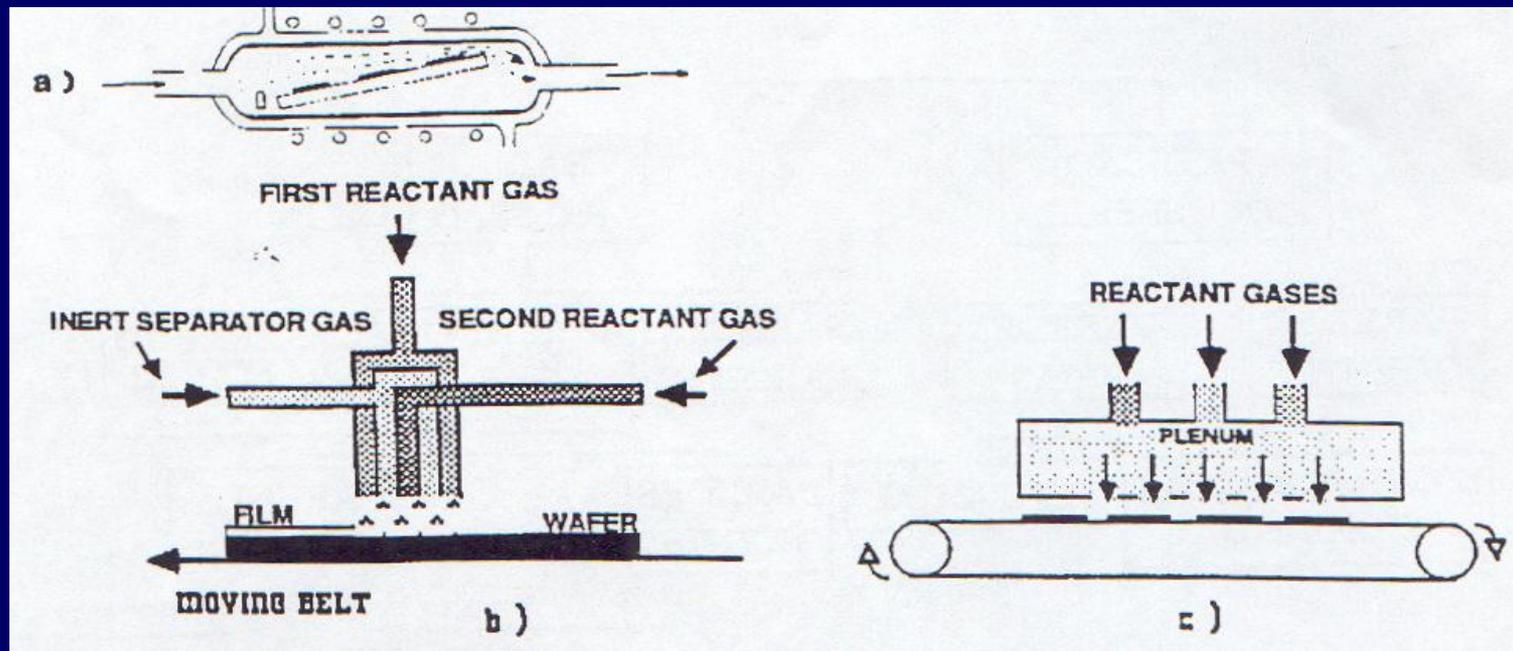


Tipos de Reatores

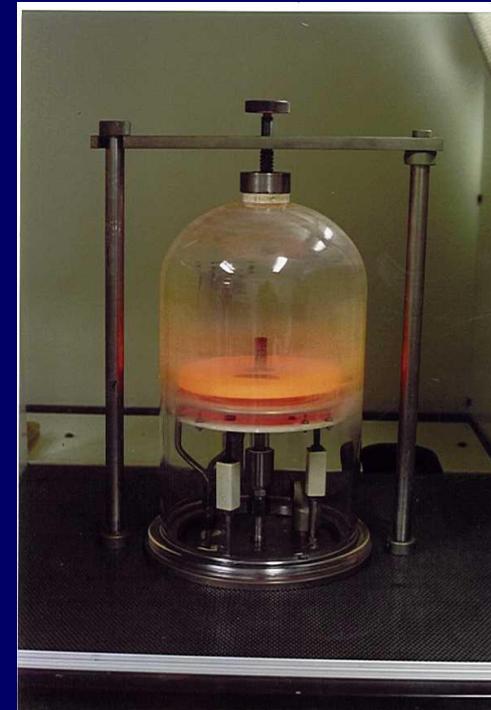
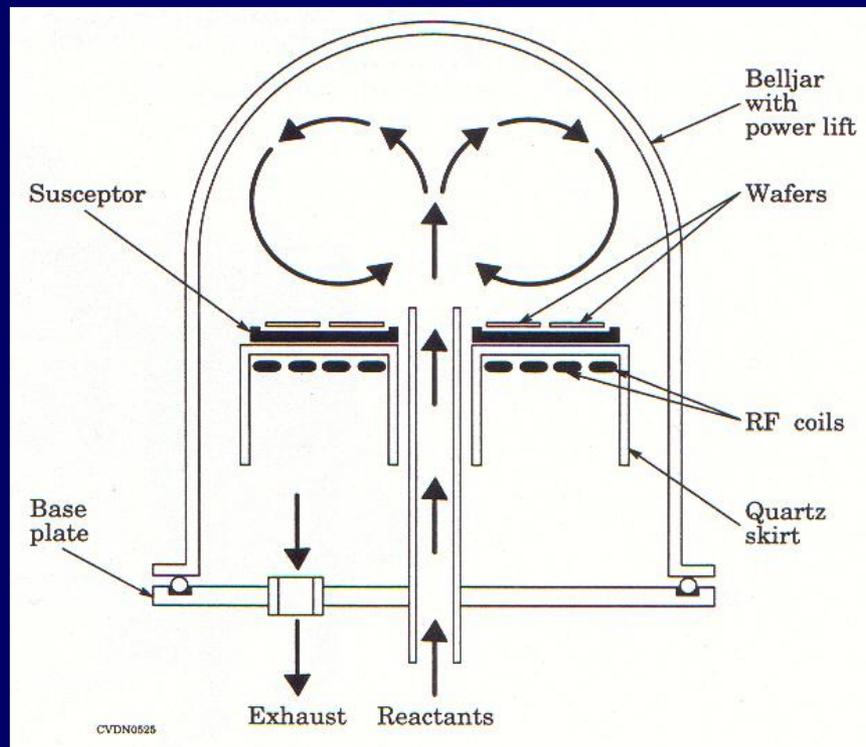
• **Reatores CVD de Pressão Atmosférica - APCVD**

Características:

- **operam normalmente na condição de taxa limitado por transporte de espécies \Rightarrow fluxo deve ser idêntico sobre todas as lâminas \Rightarrow pode processar poucas lâminas por vez;**
- **estrutura do reator é bastante simples;**
- **alta taxa de deposição;**
- **é susceptível à reações em fase gasosa (reação homogênea) \Rightarrow causa particulados e filme pouco denso;**
- **cobertura de degrau pobre;**
- **necessita de limpeza frequente;**
- **É usado para deposição de SiO_2 (dopado e não dopado) em baixa temperatura ($\sim 400^\circ\text{C}$)**



Reatores APCVD: (a) horizontal (tubo de parede quente), (b) sistema de movimento contínuo com injeção de gás e (c) APCVD de movimento contínuo tipo plenum.



Reator Epitaxial ou reator vertical tipo Bell-Jar ou Pancake aquecido por indução.

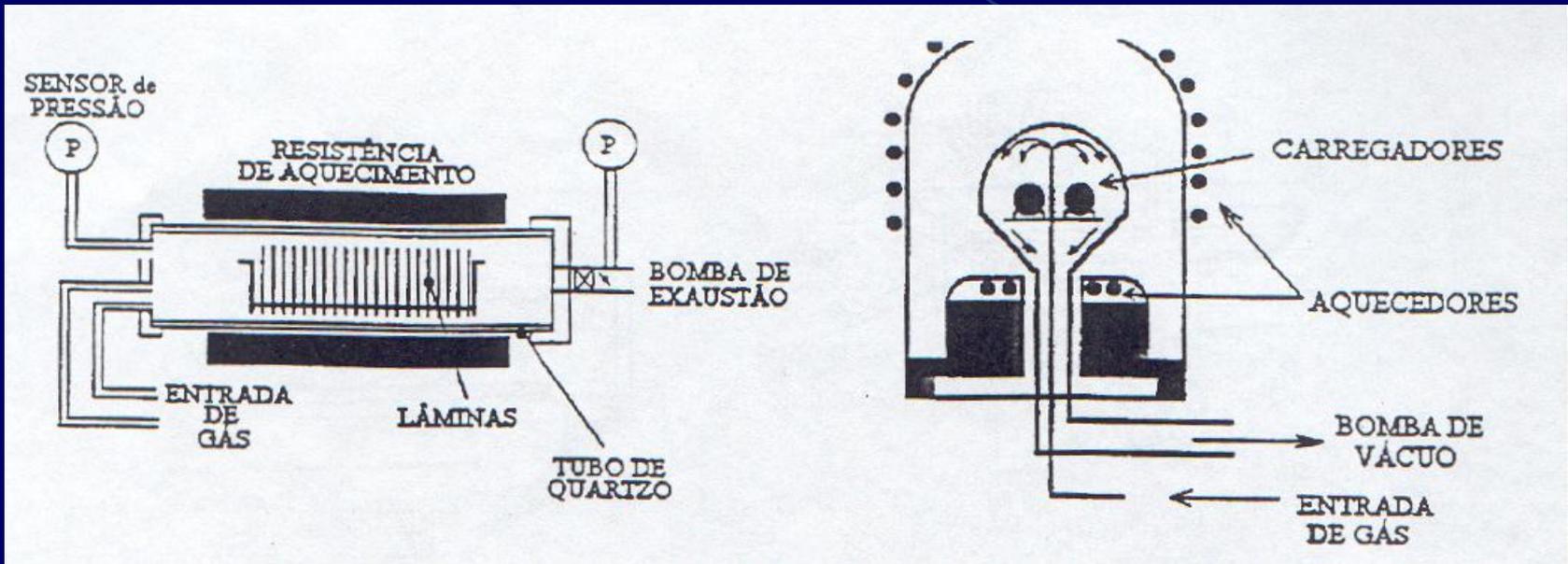
• Reatores CVD de Baixa Pressão - LPCVD

Pressão Reduzida(0.25 – 2.0 Torr) \Rightarrow aumenta difusibilidade das espécies ($\sim 10^3$ vezes).

Processo \Rightarrow opera em taxa limitado por reação.

Características do Sistema:

- menos reação na fase gasosa \Rightarrow menor geração de partículas;
- boa uniformidade;
- boa cobertura de degraus;
- baixa taxa de deposição (10 – 50 nm/min.);
- não requer uniformidade de fluxo, mas sim de temperatura \Rightarrow pode se utilizar um forno convencional \Rightarrow pode processar muitas lâminas por vez (até ~ 200);
- usado para deposição de: Si-poli, Si_3N_4 , SiO_2 , PSG, BPSG, W, etc.



(a)

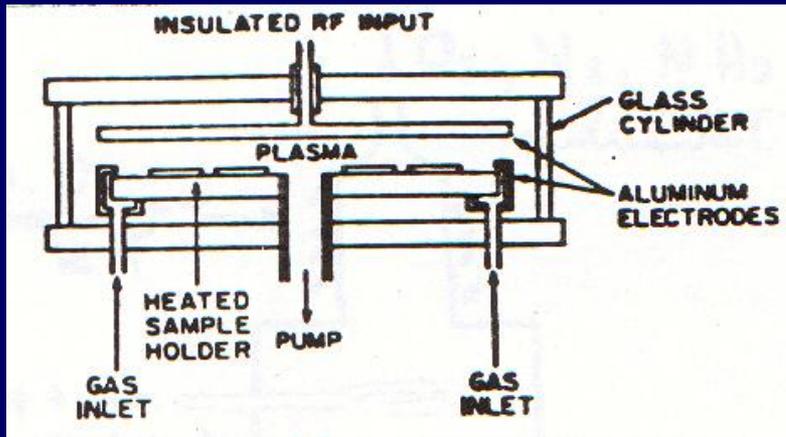
(b)

Reatores LPCVD de parede quente (a) e fria (b). O reator do tipo (a) pode processar até 200 lâminas por fornada. O do tipo (b) é conhecido também como reator vertical isotérmico.

• Reatores CVD Assistida por Plasma - PECVD

Características :

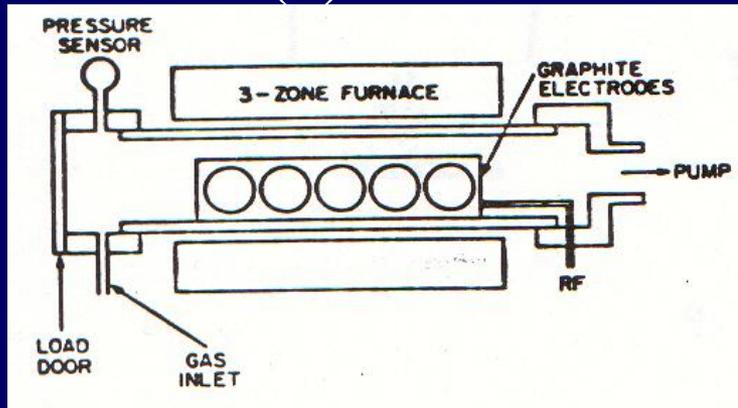
- operam em regime de taxa limitado por reação;
- taxa de deposição mais elevada que o LPCVD;
- operam em temperatura mais baixa que nos processos APCVD e LPCVD
⇒ permite depositar filmes de SiO_2 e Si_3N_4 sobre metais de baixo ponto de fusão. ⇒ importante quando já existe Al na lâmina;
- boa adesão e boa cobertura de degraus, devido à maior mobilidade superficial das espécies adsorvidas;
- filmes não são estequiométricos;
- há incorporação de subprodutos de reação, especialmente hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Pode resultar em degaseificação, formação de bolhas e quebras do filme durante etapas posteriores;
- é um processo mais complexo, com mais parâmetros;
- pode depositar SiO_2 , Si_3N_4 , oxinitretos, SiC, a-Si, etc.;
- PECVD a temperatura mais elevada permite crescer epi: Si, Ge e III-V.



(a)

(a) Reator de Fluxo Radial(Placas Paralelas)

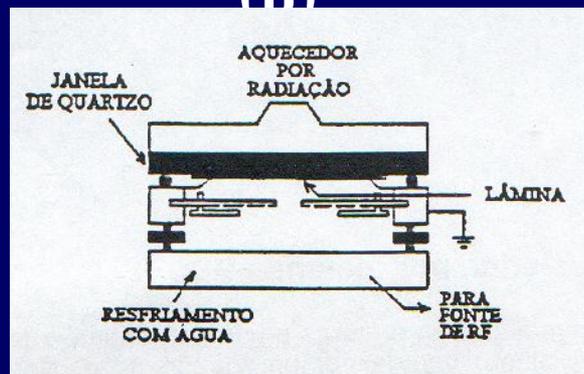
- + baixa temperatura;
- capacidade limitada;
- manual;
- podem cair partículas sobre o filme/substrato.



(b)

(b) Reator Horizontal de Parede Quente

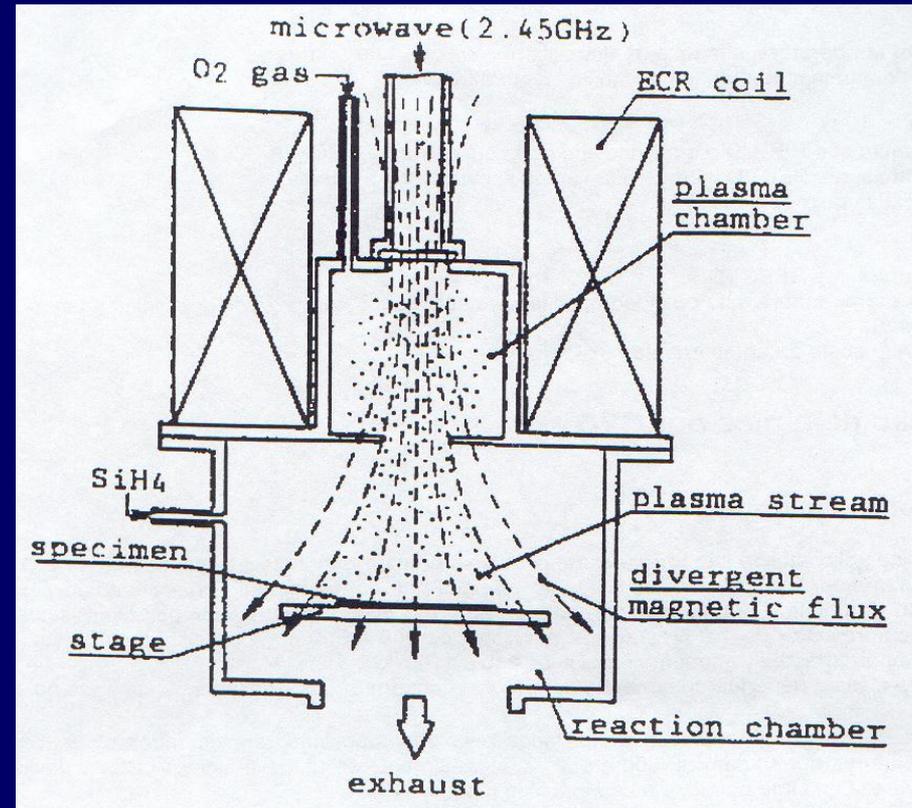
- + lâminas em pé e paralelo ao fluxo;
- + alta capacidade;
- + baixa temperatura;
- manual;
- Geração de partículas durante a carga.



(c) Reator Planar de Parede Fria para Substrato Único

- **Reatores CVD com Plasma Remoto – RPECVD**
(remote, indirect ou downstream PECVD)

A câmara onde o plasma é gerado está separada da câmara de reação onde se encontram os substratos. \Rightarrow os substratos não ficam expostos diretamente à radiação do plasma e portanto não são bombardeados pelos íons de alta energia.



Reator ECR. Neste tipo de reator o plasma é gerado por um campo elétrico com frequência de microondas em um campo magnético que provoca a ressonância ciclotrônica do elétron. Plasma 100 vezes mais denso em espécies reativas.

• Características e Aplicações de Reatores CVD

Processos	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
APCVD	<p>Simples</p> <p>Alta taxa de deposição</p> <p>Baixa temperatura</p>	<p>Cobertura de degraus ruins</p> <p>Contaminação por partículas</p>	<p>Óxidos de baixa temperatura, dopados ou não</p>
LPCVD	<p>Excelente uniformidade e pureza</p> <p>Processamento de muitas lâminas por vez (até 200)</p>	<p>Alta temperatura</p> <p>Baixa taxa de deposição</p>	<p>Óxidos de alta temperatura, dopados ou não, nitreto de silício, polisilício, W e WSi.</p>
PECVD	<p>Baixa temperatura</p> <p>Alta taxa de deposição</p> <p>Boa cobertura de degrau</p>	<p>Contaminação química, como H₂ e por particulados</p>	<p>Deposição de dielétricos sobre metais em baixa temperatura e nitreto de silício</p>
RPECVD	<p>Mesmas que PECVD sem a radiação do substrato pelo plasma</p>	<p>Baixa taxa de deposição</p>	<p>Mesmas que PECVD e dielétricos de porta em estruturas MOS</p>
ECR	<p>Baixa temperatura</p> <p>Alta qualidade dos filmes depositados</p> <p>Alta taxa de deposição</p> <p>Boa cobertura de degrau</p>	<p>Alto custo do equipamento</p>	<p>Mesmas que RPECVD</p>