

EPITAXIA POR FEIXE MOLECULAR DE PELÍCULAS DE SILÍCIO
DOPADAS POR ÍONS DE ARSÊNICO

R.P. de Carvalho

Departamento de Física - ICEX - UFMG

A. Vapaille

Université Paris XI - Orsay, França

RESUMO

A epitaxia sob vácuo (MBE) permite a obtenção de filmes de Silício comparáveis ou superiores aos obtidos por deposição química (CVD). A baixa temperatura de deposição permite a elaboração de filmes com gradiente de dopagem hiperabrupto. É conveniente dispor de uma técnica de dopagem que permita larga faixa ($10^{15} - 10^{19} \text{cm}^{-3}$), controle da concentração e gradiente de dopagem da ordem de $10\text{\AA}/\text{década}$.

As fontes de efusão clássicas não atendendo a estas exigências, construímos uma fonte de Arsênico do tipo "Hot Cathode Electrostatic Reflex", e dopamos os filmes epitaxiais por implantação dos íons As a 1000 eV durante a deposição. Os filmes têm planeidade e cristalografia satisfatórias, dinâmica de dopagem entre 10^{17} e $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ e gradientes de dopagem avaliados em $60\text{\AA}/\text{década}$. As concentrações encontradas por SIMS concordam com os valores calculados a partir da corrente iônica incidente e da taxa de deposição (todo o As implantado é incorporado) e com a concentração de portadores de carga deduzida das medidas elétricas (todo o As é eletricamente ativo). A dopagem por implantação de íons parece portanto atender às exigências de dinâmica, controle e gradiente de dopagem desejadas e será usada na fabricação de superredes de dopagem.

1 - INTRODUÇÃO

O problema da dopagem de películas de Silício obtidas por epitaxia sob vácuo é de interesse atual. Um método de dopagem, para ser eficiente, deve permitir:

- faixa de dopagem entre 10^{15} e 10^{19}cm^{-3}
- gradientes de dopagem da ordem de $10\text{\AA}/\text{década}$
- controle fácil e permanente do nível de dopagem.

Os métodos de dopagem propostos utilizam, seja fontes de efusão (coevaporação do elemento dopante e do Silício), seja a implantação de íons dopantes a baixa energia (I_2 MBE - Ion Implantation Molecular Beam Epitaxy). A tabela I compara resultados obtidos com diferentes variantes dos dois métodos.

Os métodos de coevaporação "clássicos" possuem duas vantagens principais, um coeficiente de incorporação fraco e dependente da temperatura do substrato e o efeito de segregação do dopante na superfície, que limita o caráter abrupto dos perfis de dopagem à gama de $100\text{\AA}/\text{d\`e}c\grave{a}d\grave{a}$. Foram propostos vários refinamentos para os métodos clássicos de coevaporação:

- a polarização negativa do substrato com relação às fontes de Silício

TÉCNICA	DOPANTE	CONCENTRAÇÃO cm^{-3}	GRADIENTE $\text{\AA}/\text{dec.}$	REF.	
COEVAPORAÇÃO	regulagem temp. substrato	Sb	$2 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{17}$	200	6
	regulagem pela temperatura do fluxo do dopante	Ga	$1 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{17}$	300	7
		Sb	$4 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$	400	8
	polarização do substrato	Sb	$3 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{19}$	50	9
		B	$1 \cdot 10^{15} - 8 \cdot 10^{19}$	100	1
	bombardeio eletrônico	Sb	$5 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{19}$	300	1
	build up/flash off	Sb	$1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{19}$	-	2
		B	$2 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{17}$	250	3
Sb		$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{19}$	30	3	
I_2 MBE	com gás vetor	As	$2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16}$	250	4
		Sb	$1 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{19}$	30	5
	sem gás vetor	As	$9 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{19}$	50	10

Tabela I - Comparação entre as técnicas de dopagem de películas de Silício por MBE

e de dopante⁽¹⁾ ou o bombardeio do substrato com eletrons⁽²⁾ aumentam o coeficiente de incorporação, permitindo uma elevação do limite superior dos níveis de dopagem acessíveis (de 10^{17} para 10^{19} cm^{-3}). Interrompendo-se o crescimento da película no momento da abertura ou fechamento do fluxo dopante ("build up-flash off"), podem-se melhorar os perfis (30\AA por década⁽³⁾), mas o procedimento se complica.

Os métodos de implantação de íons dopantes ($I_2\text{MBE}$)⁽⁴⁻⁵⁾ apresentam duas dificuldades: o uso de uma aparelhagem complicada e a necessidade de diluir o vapor do elemento dopante em um gás vetor (Ar), obrigando a uma filtragem em massa dos íons na saída da fonte, pois a corrente de íons necessária sobre o substrato é extremamente fraca (alguns nA. cm^{-2}). As dificuldades da $I_2\text{MBE}$ podem ser em grande parte eliminadas com as fontes miniatura sem gás vetor.

2 - A MONTAGEM $I_2\text{MBE}$

A montagem $I_2\text{MBE}$ construída em Orsay (Fig. 1) consiste em uma Câmara de deposição com a fonte de Si evaporado (canhão eletrônico), o porta-amostras aquecedor e uma câmara com a fonte de íons, a ótica de transporte, a deflexão e varredura do feixe.

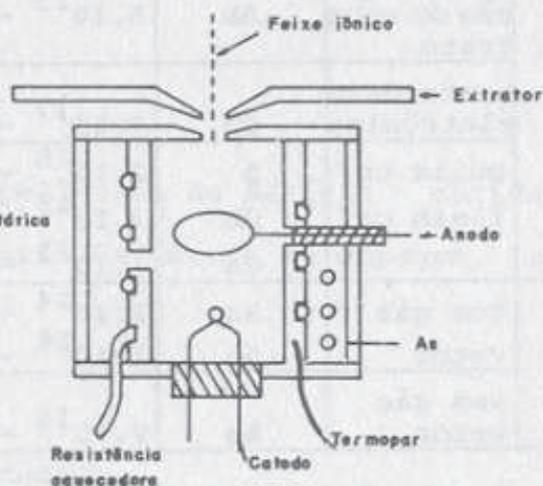
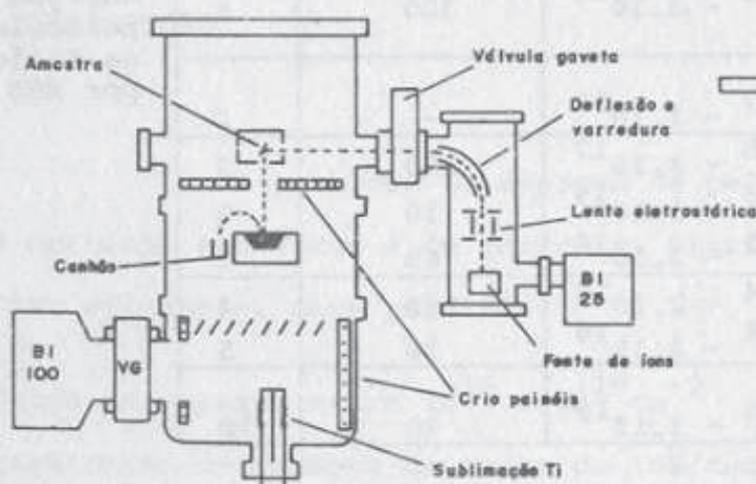


Figura 1 - Montagem $I_2\text{MBE}$

Figura 2 - Câmara de ionização

A fonte de íons As é do tipo "Reflexo Eletrostatico de Catodo Quente"⁽¹¹⁾. Numa câmara de descarga cilíndrica ($\phi 14\text{mm}$, $H25\text{mm}$) um filamento de W emite elétrons. Estes são atraídos por um anodo toroidal (fio de W de $300\mu\text{m}$). Devido à pequena superfície do anodo, os elétrons tem probabilidade muito baixa de alcançá-lo diretamente, oscilando na cavidade e em seu percurso na câmara de descarga, ionizando os átomos de As sublimados num forno anular que se comunica com a câmara de descarga através de um orifício. Os íons de As assim obtidos são extraídos por um orifício de $0,7\text{mm}$.

Os parâmetros de funcionamento típicos da fonte são: temperatura do forno As $260-280^{\circ}\text{C}$, corrente de descarga $10-35\text{mA}$, tensão de descarga $40-70\text{V}$, tensão de extração 1000V , corrente extraída $3-10\mu\text{A}$. Após focalização e varredura a densidade de correntes sobre o substrato varia de $0,5$ a 20 nAcm^{-2} , o que corresponde à gama de dopagem de $9 \cdot 10^{16}$ a $2 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$.

3 - PELÍCULAS EPITAXIAIS COM IMPLANTAÇÃO DE ÍONS DOPANTES

Os filmes realizados constituem-se de uma pré-camada não-dopada de 1000 a 8000Å e de uma camada dopada As de 1000 a 5000Å . A temperatura mínima de epitaxia é de cerca de 650°C para as películas dopadas com As, cerca de 50°C acima da temperatura de epitaxia das películas não implantadas. A 750°C , observam-se linhas de Kikuchi bem contrastadas na difração de elétrons de alta energia por reflexão (RHEED), revelando a boa qualidade cristalina e uma superfície plana.

A dosagem de impurezas de massa atômica superior a 29 foi feita por retroespalhamento de Rutherford (RES) com íons Neônio de 2 MeV . Um espectro típico é mostrado na figura 3. Observa-se um pico de superfície As (canal 120) correspondendo a uma concentração de $3,7 \times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ e um "plateau" As de volume (entre os canais 65 e 120) cor

respondendo a uma concentração de $1,6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, valor confirmado pelo cálculo a partir da corrente iônica e taxa de crescimento (ver tabela II, amostra As 22). O pico As de superfície aparece também em películas não implantadas, mas realizadas com a fonte de As em funcionamento. Ele é atribuído à condensação do As residual após a deposição. As duas estruturas observadas nos canais 185 e 135 são atribuídas respectivamente ao Sb proveniente da fonte Si evaporada e ao Ta depositado sobre a parte posterior do substrato para facilitar seu aquecimento por efeito Joule.

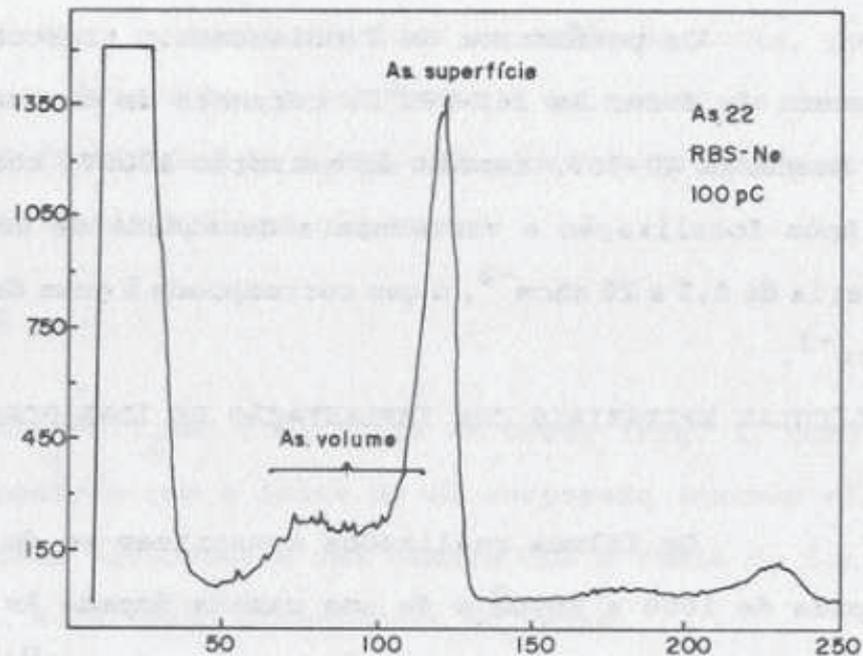


Figura 3: análise RBS de uma película de Si dopada com As

O perfil de As nas películas foi estudado por espectroscopia de massa de íons secundários (SIMS). Um perfil típico é dado na figura 4 (concentração no filme dopado: $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Nota-se a característica abrupta do perfil de dopagem na interface entre a película dopada e a pré-camada (1 min. corresponde a 250 \AA).

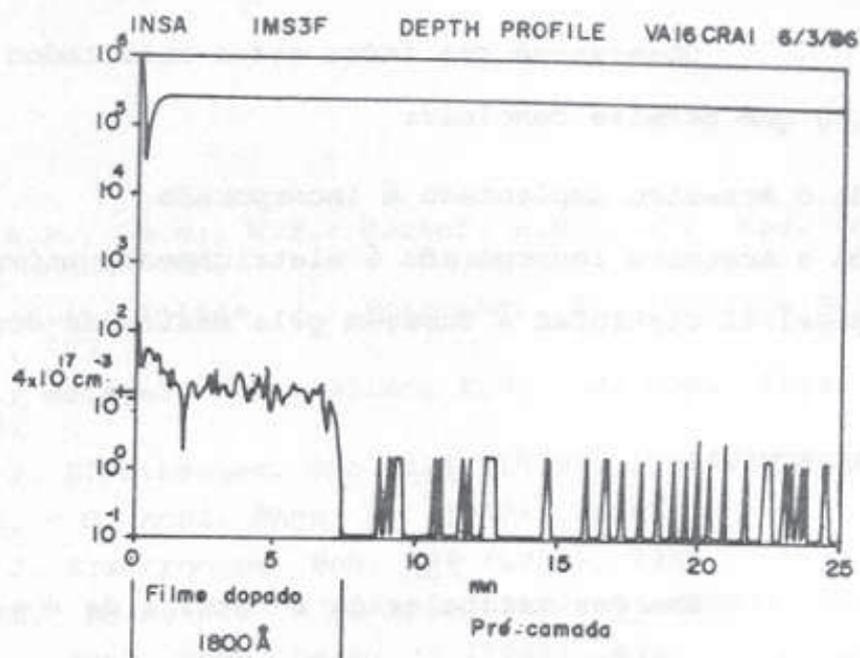


Figura 4: análise SIMS de uma película de Si dopada com As

Finalmente a atividade elétrica do As implantado foi testada através da medida de R das películas. A tabela II compara as concentrações dos portadores de carga calculadas a partir da corrente iônica e taxa de crescimento e com aquelas medidas por RBS e SIMS.

AMOSTRA	CALCULADA	R	RBS	SIMS
As 10	$1,3 \cdot 10^{19}$	-	$2 \cdot 10^{19}$	-
As 12	$4 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{19}$	-	$6 \cdot 10^{18}$
As 13	$1 \cdot 10^{18}$	$7 \cdot 10^{17}$	-	-
As 14	$1,8 \cdot 10^{18}$	-	-	$2 \cdot 10^{18}$
As 16	$2,5 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{18}$	-	$4 \cdot 10^{17}$
As 17	$1,3 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$	-	-
As 19	$7 \cdot 10^{17}$	-	$7 \cdot 10^{17}$	-
As 22	$1,5 \cdot 10^{19}$	-	$1,6 \cdot 10^{19}$	-

Tabela II - Comparação dos valores de concentração de portadores de carga (cm^{-3}) determinados por diferentes métodos.

Observa-se que todos esses resultados são coerentes entre si, o que permite concluir:

- 1 - Todo o Arsenico implantado é incorporado;
- 2 - Todo o Arsenico incorporado é eletricamente ativo;
- 3 - É possível controlar a dopagem pela medida da corrente iônica.

4 - PERSPECTIVAS

Uma vez estabelecida a técnica de dopagem, esta tem sido utilizada na realização de estruturas de dopagem bidimensionais N^{++} v N^{++} v... As propriedades esperadas destas superredes de dopagem são as seguintes: os elétrons se difundem dos dois lados dos planos de dopagem, encontrando-se assim afastados das impurezas ionizadas. Deve-se então observar um aumento da mobilidade de portadores a baixa temperatura para direções do campo elétrico paralelas aos planos de dopagem. As medidas nas superredes de dopagem realizadas estão em curso atualmente.

AGRADECIMENTOS - Agradecemos B. Agius (ENS, Univ. Paris VII, França) pela sua ajuda na realização dos espectros RBS; M. Dubois (INSA, Lyon, França) e C. Villegier (LETI - Grenoble, França) pelos perfis SIMS.

CURSO BÁSICO DE TECNOLOGIA DE VÁCUO

Disciplina: Física (20 horas)

Lição: Condensação

BIBLIOGRAFIA:

- 1 - Kubiak, R.A.A.; Leong, W.Y.; Parker, E.H.C. - J. Vac. Sci. Technol B3 (1985), 592
- 2 - d'Avitaya, F.A.; Delage, S.; Rosencher, E. - Surface Sciences 168 (1986), 483
- 3 - Iyer, S.S.; Metzger, R.A.; Allen, F.G. - J. Appl. Phys. 55 (1984), 931
- 4 - Ota, Y. - J. Electrochem. Soc. 126 (1979), 1761
- 5 - Sugiura, H. - J. Appl. Phys. 51 (1980), 2630
- 6 - Ota, Y. - J. Electrochem. Soc. 124 (1977), 1795
- 7 - Becker, G.E.; Bean, J.C. - J. Appl. Phys. 48 (1977), 3395
- 8 - Bean, J.C. - Appl. Phys. Lett. 33 (1978), 654
- 9 - König, U.; Kibbel, H.; Kasper, E. - J. Vac. Sci. Technol. 16 (1979), 985
- 10- de Carvalho, R.P.; Djebbar, N.; Gutierrez, J.; Vapaille, A - J. Vac. Sci. Technol. B5 (1987), 515
- 11- Lejeune, C.; Gautherin, G. - Vacuum 34 (1984), 251

PREPARAÇÃO DE FILMES FINES

Disciplina: Física (20 horas)

Lição: Condensação

Página: 20

Lição: 15 de Física (20 horas)

Lição: 15 de Física (20 horas)

Disciplina: Física (20 horas)

FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DOS CONDUTORES FINES E FILMES

Disciplina: Física (20 horas)

Lição: Condensação

Página: 20

Lição: 15 de Física (20 horas)

Lição: 15 de Física (20 horas)

Disciplina: Física (20 horas)

MATERIAIS DE SUPERFÍCIE E INTERFACES

Disciplina: Física (20 horas)

Lição: Condensação

Página: 20

Lição: 15 de Física (20 horas)

Lição: 15 de Física (20 horas)

Disciplina: Física (20 horas)