

## EPITAXIA POR FEIXE MOLECULAR DE SEMICONDUTORES III-V

J.C. Bezerra, I.F.L. Dias, R.P. de Carvalho, A.G. de Oliveira  
César A.C. Mendonça(\*), Flávio Plentz(\*), Eliermes A. Menezes(\*)

Departamento de Física, ICEx, UFMG  
(\* ) DFESCM, IFGW, UNICAMP

MBE (Molecular Beam Epitaxy) é uma técnica de crescimento epitaxial de filmes finos de semicondutores e metais em condições de ultra-alto-vácuo ( $\sim 10^{-11}$  Torr). Esta técnica permite baixas vel. de crescimento ( $0,1-2,0 \mu\text{m/h}$ ), e baixas temp. de crescimento ( $600^\circ\text{C}$  p/GaAs,  $700^\circ\text{C}$  p/AlGaAs).

Neste artigo apresentamos os resultados de crescimentos de amostras de GaAs dopado e não dopado que foram caracterizadas por Fotoluminescência, efeito Hall e Microscopia Eletrônica de Varredura.

## I. INTRODUÇÃO

A faixa de temperaturas para qual o crescimento homoepitaxial de GaAs pode ser mantido estende-se de  $-90$  a  $730^\circ\text{C}$  (1), (2). A temperatura mínima é determinada pela adsorção não dissociativa do  $\text{As}_4$ , enquanto o limite superior é fixado pela dissociação térmica do GaAs. Na prática, a temperatura mínima necessária para se conseguir propriedades elétricas razoáveis está por volta de  $400^\circ\text{C}$  (3), enquanto as temperaturas máximas para as quais superfícies de alta qualidade podem ser obtidas estão por volta de  $700^\circ\text{C}$  (4).

As superfícies das camadas epitaxiais depositadas sobre substratos orientados na direção  $\langle 100 \rangle$  e crescidas sob boas condições são suaves e tem como característica uma aparência especular. Em geral, as boas condições de crescimento para manter excelentes morfologias superficiais é um compromisso entre a temperatura de crescimento  $T_s$  e a razão de fluxos do elemento do grupo V (arsênio) para o elemento do grupo III (gálio),  $R = J_{\text{As}_4}/J_{\text{Ga}}$ , esta razão aumentando com o aumento da temperatura de crescimento (5).

Nas seções a seguir apresentamos alguns

resultados do crescimento homoepitaxial de GaAs, isto é, o crescimento onde a camada de GaAs é depositada sobre um substrato de GaAs. Os resultados apresentados são de camadas de GaAs não dopado e dopado do tipo p crescidos sob boas condições. O dopante tipo p usado é o Berílio.

## II. EXPERIMENTAL

As camadas de GaAs foram crescidas em um equipamento Riber 2300 R&D que possui câmara para carregamento e troca de amostras. A câmara de carregamento em condições normais está em UHV ( $-2 \times 10^{-9}$  Torr), o mesmo acontecendo com a câmara de epitaxia ( $-4 \times 10^{-11}$  torr). Antes do crescimento os substratos de GaAs passam por um procedimento de limpeza, e a seguir são soldados com In sobre um porta-amostras de molibdênio. O procedimento de limpeza dos substratos que adotamos foi proposto por Cho. et-al. (6), e consiste de uma limpeza orgânica seguida por uma decapagem química. Todo o processo de limpeza e solda sobre o porta-amostras é feito sob um fluxo laminar dentro de uma capela.

Após a solda com In os substratos são introduzidos na câmara de carregamento onde sofrem um processo de degaseificação de baixa temperatura ( $-300^\circ\text{C}$ ) por 12 horas, quando então são transferidos para a câmara de epitaxia para o crescimento das camadas.

## III. RESULTADOS

## A. GaAs não Dopado

A figura (1) mostra a superfície de uma camada de GaAs não dopado crescido com  $T_s = 600^\circ\text{C}$ . A fotografia foi obtida com um aumento de 1100x utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura. As temperaturas das células de efusão de As e de Ga foram fixadas de modo a dar uma razão de fluxos  $R \approx 1.35$ , e uma taxa de crescimento da camada de  $r \approx 1.1 \mu\text{m/h}$ . Antes de iniciar o crescimento, o substrato de GaAs passou por um processo de degaseificação de alta temperatura ( $-630^\circ\text{C}$ ), de modo a desorver a camada de óxidos sobre a superfície que é formada principalmente durante a solda do substrato ao porta-amostras de molibdênio (7). Pode-se observar da fi

gura (1) o aspecto extremamente suave da superfície da camada, característico de amostras crescidas em boas condições de crescimento. Podemos notar ainda a ausência nesta região da amostra dos chamados "defeitos ovais", que são defeitos de crescimento que aparecem em camadas de GaAs crescidas por MBE, e cuja origem ainda é objeto de controvérsia<sup>(8)</sup>.

A qualidade da amostra é confirmada por medidas de Fotoluminescência e medidas de efeito Hall. O espectro de Fotoluminescência obtido a  $T = 2^{\circ}\text{K}$ , utilizando como fonte de excitação em laser de  $\text{Ar}^+$  (linha 5145 Å), é mostrado na figura (2). A excelente cristalinidade é comprovada pelo aparecimento das transições excitônicas  $(F,X)$ ,  $(D^0,X)$ ,  $(A^0,X)$ ,  $(d^0,X)$ , e das linhas  $(d,X)$ , que são transições que só são observadas em MBE - GaAs<sup>(9)</sup>.

A banda situada em 1.4931 eV é devida a transições envolvendo o carbono aceitador, e a baixa intensidade do pico da banda relativo ao pico da transição  $(F,X)$ ;  $I(F,x)/I(e,C^0) \approx 0.89$ ; é um indicativo de uma amostra de alta pureza, isto é, a concentração de dopagem não intencional devida ao carbono aceitador está na faixa  $\leq 10^{15}/\text{cm}^3$ , o que foi confirmado por medidas de efeito Hall.

#### B. GaAs dopado com Berílio

Amostras de GaAs de boa qualidade dopadas com Be podem agora ser rotineiramente obtidas por MBE em nosso laboratório. O Berílio é atualmente o dopante do tipo P mais usado em GaAs e  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  crescidos por MBE devido às suas propriedades que o tornam um dopante p aproximadamente ideal: (i) é um aceitador raso ( $\approx 19\text{meV}$ ); (ii) incorpora com coeficiente de agregação unitário e tem ativação elétrica aproximadamente igual a unidade; (iii) concentrações de dopagem de  $1.0 \times 10^{15}$  a  $5.0 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  podem ser obtidas sem se observar degradação da camada em crescimento; e (iv) para a faixa de temperaturas de crescimento de 300 a 700°C difunde-se pouco no GaAs o que permite obter perfis de dopagens extremamente abruptos<sup>(10)-(14)</sup>.

Na figura (3) mostramos o espectro de Fotoluminescência de uma amostra de GaAs dopado com Be, crescida para  $T_S = 600^{\circ}\text{C}$ , uma razão de fluxos  $R \approx 1.9$  e uma taxa de crescimento de 0,7  $\mu\text{m}/\text{h}$ . A temperatura da célula de efusão do Be foi fixada em 610°C e medidas de efeito Hall à temperatura ambiente forneceram para esta camada uma dopagem  $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ , e uma mobilidade Hall  $\mu_H = 311 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ . Esta mobilidade é comparável ao valor obtido para amostras com a mesma dopagem crescidas em outros laboratórios<sup>(15)</sup>. O espectro da figura (3) mostra uma banda centrada em 1.4915 eV que se deve a transição  $(e, \text{Be}^0)$ . Esta banda é característica de amostras dopadas com Be. Podemos ver ainda neste

espectro as transições excitônicas  $(F,X)$ ,  $(A^0,X)$ , e  $(d^0,x)$ , indicativas da boa cristalinidade da amostra.

AGRADECIMENTOS - Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo financiamento parcial deste estudo.

#### IV. BIBLIOGRAFIA

- (1) J.H. Neave and B.A. Joyce - J. Cryst. Growth **43**, 204 (1978).
- (2) C. Weisbuch, R. Dingle, A.C. Gossard, and W. Wiegmann - Inst. Phys. Conf. Ser. **56**, 711 (1981).
- (3) G.M. Metzger, A.R. Calawa, and J.G. Mavroides - J. Vac. Sci. Technol. **B1**, 166 (1983).
- (4) R. Fischer, J. Klem, T.J. Drummond, R.E. Thorne, W. Kopp, H. Morkoç, and A.Y. Cho - J. Appl. Phys. **54**, 2508 (1983).
- (5) W.T. Tsang, in "Semiconductors and Semi metals", vol. 22, Part. A, R.K. Willardson and A.C. Beer eds. (Academic Press - N. York - 1985), pag. 95.
- (6) A.Y. Cho, H.C. Casey, Jr., C. Radice, and P. Foy - Electron Lett. **16** (1980).
- (7) J.P. Contour, J. Massies, and A. Saletes - Jap. J. Appl. Phys. **24**(7), L563 (1985).
- (8) M.V.B. Moreira, Tese de Mestrado, UFMG (1987).
- (9) M.S. Skolnick, C.W. Tu, and T.D. Harris - Phys. Rev. B **33**(12), 8468 (1986).
- (10) M. Ilegems - J. Appl. Phys. **48**(3), 1278 (1977).
- (11) K. Ploog, A. Fischer, and H. Künzel - J. Electrochem. Soc. **128**(2), 400 (1981).
- (12) H. Duhamel, P. Henoc, F. Alexandre, and E.V.K. Rao - Appl. Phys. Lett. **39**(1), 49 (1981).
- (13) W.V. Mc Clevege, K.V. Vaidyanathan, B.G. Streetman, M. Ilegems, J. Comas, L. Plew - Appl. Phys. Lett. **33**(2), 127 (1978).
- (14) M. Ilegems in "The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy" editado por E.H.C. Parker, Plenum (1985).

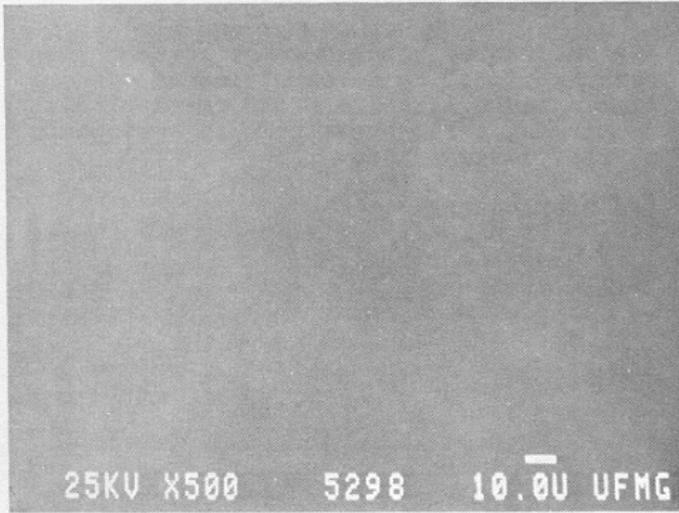


Fig. 1 - Fotografia da superfície de amostra de GaAs não dopado crescido por MBE, tomada com uma ampliação de 1100X em Microscópio Eletrônico de Varredura.

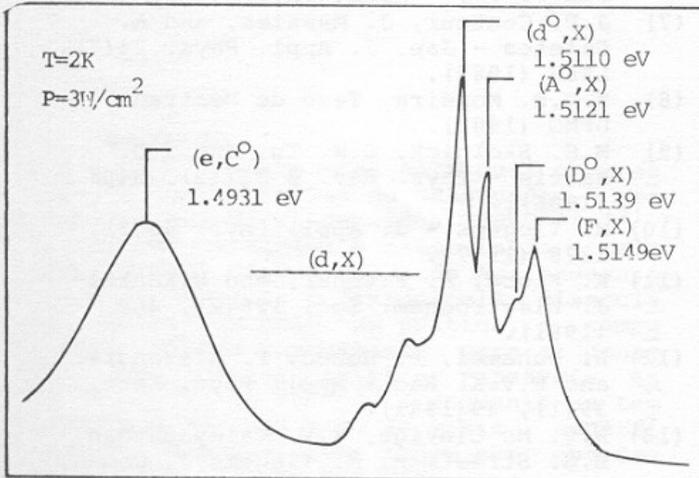


Fig. 2 - Espectro de Fotoluminescência a 2K de amostra de GaAs não dopado crescido por MBE para  $T_s = 600^\circ\text{C}$ .

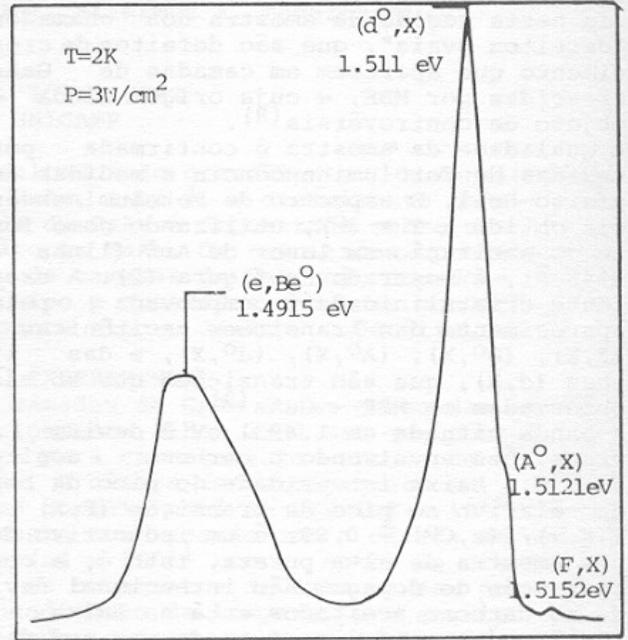


Fig. 3 - Espectro de Fotoluminescência a 2K de amostra de GaAs:Be crescido por MBE com dopagem  $p = 2.0 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ .