

INFLUÊNCIA DAS FLUTUAÇÕES DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS BARREIRAS SOBRE AS RECOMBINAÇÕES EXCITÔNICAS EM POÇOS QUÂNTICOS DE $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

S.A. Lourenço^{1*}; I.F.L. Dias²; E. Laureto²; J.L. Duarte²; M.A.T. da Silva²; A.A. Quivy³; T.E. Lamas³

¹ Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Norte do Paraná, Rua Tietê 1208, 86025-230 Londrina, PR

² Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, CP6001, 86051-970 Londrina, PR

³ Instituto de Física, Universidade de São Paulo – IFUSP, CP66318, 05315-970, São Paulo, SP

Recebido: 31 de Julho, 2005; Revisado: 24 de Junho, 2006

Palavras-chave: Fotoluminescência, Éxciton localizado, Desordem composicional.

RESUMO

O mecanismo de luminescência a baixas temperaturas em poços quânticos (QWs) de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ com diferentes concentrações de alumínio na barreira, crescido pela técnica de Epitaxia por Feixe Molecular (MBE), é estudado em detalhes empregando a espectroscopia de fotoluminescência (PL) em função da temperatura ($8\text{ K} \leq T \leq 60\text{ K}$) combinada com a intensidade de excitação. Mostramos que os efeitos da localização excitônica sobre os espectros de PL, o comportamento anômalo da dependência da posição do pico da PL com T ("blue/red-shift") e a largura de linha, são gradativamente reforçados com o aumento da concentração de Al no material constituinte da barreira. Verificamos que as flutuações da composição química do material constituinte da barreira possui forte efeito sobre o comportamento das recombinações excitônicas nos QWs de $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, em concordância com os resultados teóricos apresentado recentemente por Ponomarev e colaboradores [Phys. Rev. B 71, 155303, 2005].

ABSTRACT

The mechanism for low-temperature photoluminescence (PL) emissions in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells (QWs) with different aluminum concentrations, grown by Molecular-Beam Epitaxy (MBE), is studied in detail employing PL spectroscopy as a function of temperature ($8\text{ K} \leq T \leq 60\text{ K}$) and excitation intensity. We showed that the exciton localization effects on PL spectra, the anomalous PL peak temperature dependence (blue/red-shift) and the linewidth, are reinforced with increasing Al concentration in the barrier material. We verified that the composition fluctuation of barrier material has a strong effect on the excitonic recombination behavior in the $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ QWs, in agreement with theoretical results published recently by Ponomarev et al. [Phys. Rev. B 71, 155303, 2005].

1. INTRODUÇÃO

Em estruturas de QWs (do inglês Quantum Wells) baseados em semicondutores III-V, II-VI e suas ligas, flutuações na

largura do poço (micro-rugosidades na interface) e na composição química das ligas que compõem o material do poço de potencial e/ou da barreira de confinamento são fontes de desordem que modulam o perfil local do potencial de confinamento da heteroestrutura. Estas desordens possuem um forte efeito sobre o movimento dos portadores e as recombinações radiativas para baixas temperaturas e baixas potências de excitação são geralmente dominadas por éxcitons localizados [1-12]. As flutuações do potencial de confinamento resultam em um prolongamento ("band-tail") na densidade de estados excitônica (DOS) abaixo da distribuição dos estados fundamentais da heteroestrutura. As recombinações radiativas dos estados do "band-tail" são deslocadas para baixas energias com relação às energias de recombinação dos éxcitons delocalizados e o espectro de fotoluminescência a baixas temperaturas e baixas intensidades de excitação é assimétrico com um rabo exponencial do lado de baixa energia. Tal forma de linha do espectro de PL tem sido usada como uma impressão digital das recombinações de éxcitons localizados às desordens microscópicas presentes no material semiconductor [2,3].

Os efeitos das flutuações do potencial de confinamento sobre o processo de recombinação excitônica em poços quânticos têm sido comumente analisadas em termos das flutuações da largura do QW [4-14]. Flutuações da composição química da barreira (AlGaAs no caso do sistema $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, por exemplo) são frequentemente desconsideradas ou deixadas em segundo plano. O estudo é geralmente conduzido pela dependência da largura de linha das recombinações excitônicas em função da largura do poço [21,22] ou pela posição da energia do pico de PL (E_{PL}) em função da temperatura [13-20]. Mesmo sendo o sistema $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ um dos mais pesquisados, não encontramos na literatura um estudo experimental sobre os efeitos das flutuações da composição química da barreira sobre a energia de localização excitônica no QW em amostras com diferentes composições de Al.

A influência da concentração de Al em poços quânticos de $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ sobre o comportamento das transições excitônicas em função da temperatura foi mostrada em trabalhos recentes [23,24]. Nestes trabalhos ficou evidente que a penetração da função de onda do éxciton na barreira de potencial permite o acoplamento deste com os fônons do material

* sidney.lourenco@unopar.br

constituente da barreira, no caso a liga AlGaAs. O comportamento da transição excitônica com a temperatura para $T > 60$ K ressalta a interação do éxciton com os fônons ópticos LO. A energia dos fônons LO e a intensidade da interação éxciton-fônon-LO aumentam com a concentração de Al o que leva a um maior valor da largura de linha da emissão excitônica e reforça a variação do gap de energia com T , principalmente na região de altas temperaturas ($T > 150$ K) onde o coeficiente de variação do gap com T (dE/dT) é constante [25]. Na região de baixas temperaturas a interação éxciton-fônon é determinada pelos fônons acústicos LA que, entretanto não depende da concentração de Al. Assim um estudo a baixas temperaturas ($8 \text{ K} \leq T \leq 60 \text{ K}$) em poços quânticos de AlGaAs/GaAs com variação da concentração de Al permite analisar somente os defeitos das interface e da flutuação da composição química da liga sobre a forma de linha da luminescência.

Neste artigo, apresentaremos uma análise da influência da composição química da barreira sobre a energia de localização excitônica em QWs de AlGaAs/GaAs usando PL em função da temperatura combinada com a intensidade de excitação.

2. AMOSTRAS E DETALHES EXPERIMENTAIS

Neste trabalho analisamos três amostras de $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ crescidas pela técnica de Epitaxia por Feixe Molecular (MBE) sobre substrato de GaAs orientado na direção (100). Cada amostra consiste de dois poços quânticos de mesma largura (60 Å), com barreiras de diferentes alturas, $0,05 \leq x \leq 0,35$. As barreiras foram crescidas com 800 Å de largura para evitar o acoplamento entre os poços. Sobre o substrato, foi crescido uma camada “buffer” de GaAs com 0,1 µm de espessura, uma super-rede com 10 períodos de $[(AlAs)_5(GaAs)_{10}]$, uma outra camada de GaAs, com 0,2 µm de espessura e as estruturas dos poços quânticos de AlGaAs/GaAs. A amostra foi finalizada com uma camada tampão de GaAs de 50 Å. A Figura 1 mostra uma representação esquemática da estrutura destas amostras onde b1 representa a altura da barreira do poço com menor concentração de alumínio e b2 a altura da barreira do outro poço. Na Tabela 1 mostramos os principais dados das amostras. O pequeno valor da largura de linha a meia altura (FWHM) dos espectros de PL, inferior a 2 meV (para concentração de Al = 0,05), à temperatura de 8 K, é um indicativo da boa qualidade das amostras.

As medidas de PL foram realizadas usando a linha 5145 Å de um laser de Ar^+ com um “spot” de diâmetro de ~100 µm. As análises espectrais das medidas de luminescência foram realizadas empregando um monocromador com comprimento focal de 0,5 m e um fotodiodo *pin* de GaInAs, refrigerado termoelectricamente, usando a técnica padrão “lock-in”. A variação da temperatura (8 – 60 K) foi obtida usando um criostato de ciclo fechado de He.

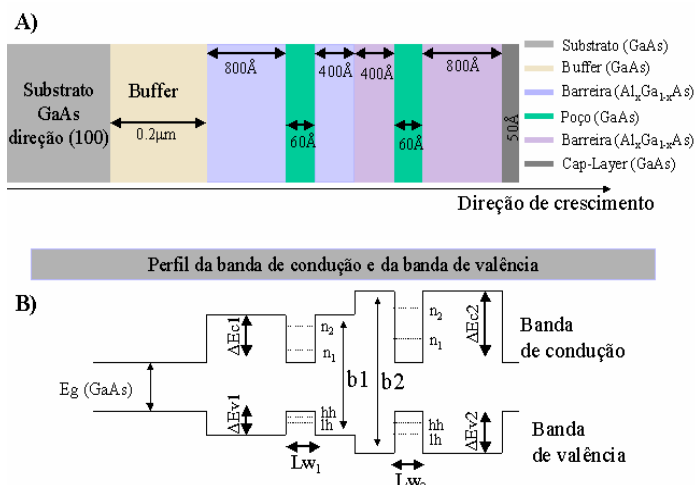


Figura 1 – A) Representação esquemática da estrutura de poços quânticos duplos não acoplados, com a largura nominal de cada camada. B) Representação do perfil de potencial dos dois poços quânticos. b1 e b2 representam os valores dos Gaps de energia da barreira de menor e de maior concentração de alumínio, respectivamente e $L_{w1} = L_{w2} = 60$ Å.

Tabela 1 – Dados das amostras. x_1 e x_2 são as composições nominais de alumínio nas barreiras e E_{PL} é a energia do pico da PL.

Amostras	x_1 (%)	x_2 (%)	E_{PL} (eV)
#2446	5	23	1,5523
#2447	11	27	1,5705
#2448	14	35	1,5825

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresentamos os espectros de PL das amostras de AlGaAs/GaAs com diferentes concentrações de alumínio à temperatura de 8 K sob intensidade de excitação de 2,0 W/cm². Observa-se, nesta figura, dois comportamentos teoricamente conhecidos em heteroestruturas de poços quânticos de AlGaAs/GaAs quando aumenta a concentração de alumínio na barreira: o deslocamento para maiores energias dos estados quantizados (devido ao aumento da altura da barreira), o que induz o deslocamento observado da energia de transição excitônica (veja a Tabela 1) e um aumento gradativo da largura de linha dos espectros. A variação da largura de linha com a concentração de Al pode ser visualizada na Figura 3. Observa-se que a composição química do material constituinte da barreira, AlGaAs, influencia significativamente a largura de linha das transições excitônicas no poço quântico do sistema AlGaAs/GaAs.

O aumento da concentração de alumínio na liga aumenta a altura da barreira de potencial o que leva a um aumento do confinamento quântico do éxciton. Assim, a penetração da função de onda excitônica deve diminuir à medida que a concentração de alumínio aumenta. Deste modo, o aumento da concentração de Al levaria a uma diminuição da FWHM, pois uma menor penetração da função de onda acarretaria uma menor interação do éxciton com as desordens da liga.

Por outro lado, Singh e Bajaj [1] desenvolveram um modelo para material “bulk”, relacionando as flutuações da composição da liga AlGaAs com a largura de linha excitônica. Neste modelo a largura de linha aumenta com a concentração de alumínio. Portanto, a Figura 3 mostra que a redução da FWHM devido à diminuição da penetração da função de onda excitônica na barreira é superada pelo aumento da FWHM devido ao aumento das flutuações da composição da liga. Adicionalmente, devemos esperar que a qualidade das interfaces piore com o aumento da concentração de Al o que contribuiria para o aumento da FWHM.

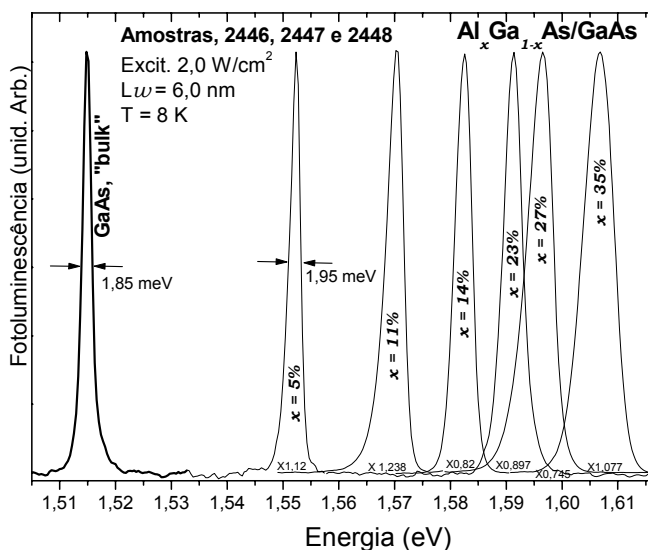


Figura 2 – Espectros de fotoluminescência obtidos para $T = 8$ K com a mesma configuração do experimento de PL, isto é, mesma largura de fenda, mesma potência de excitação $2,0 \text{ W/cm}^2$, etc.

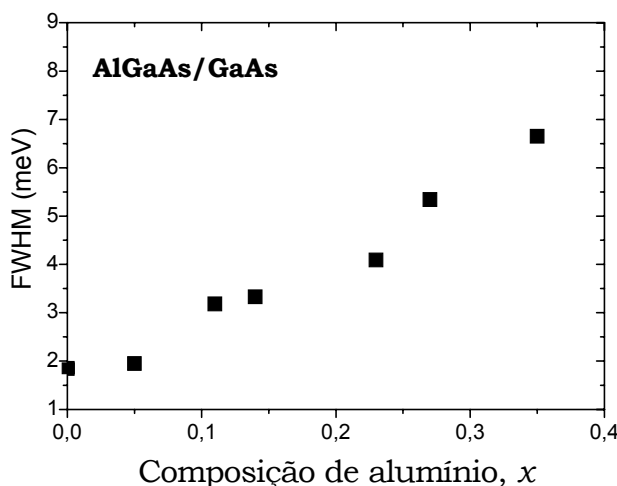


Figura 3 – FWHM dos espectros de PL das transições $n1\text{-}hh1$ de todas as amostras em $T = 8$ K sob mesma potência de excitação. A única variável que se modifica entre as amostras é a concentração de Al na barreira. O ponto para $x = 0$ (GaAs) foi obtido da recombinação excitônica da camada “buffer” da estrutura de poço quântico.

Na Figura 4 mostramos o comportamento dos espectros de PL em função da temperatura para a amostra 2448. Observa-se que a E_{PL} aumenta (“blue-shift”) com o aumento da temperatura, desviando-se da dependência usual da E_{PL} com T , atingindo um valor máximo (E_M) e depois volta a diminuir. Entre os dois poços, o valor do “blue-shift” é maior naquele que possui maior concentração de Al na barreira. A Figura 5 mostra o comportamento da E_{PL} com a temperatura no intervalo $8 \text{ K} \leq T \leq 45 \text{ K}$ para todas as amostras. Também mostramos, para efeito de comparação, os resultados obtidos do GaAs “bulk” medidos a partir da camada “buffer” da amostra 2446. Observa-se um aumento consistente da magnitude do “blue-shift” assim como o deslocamento da energia E_M para maiores temperaturas quando a concentração de alumínio na barreira aumenta. Para $x = 0,05$ o efeito do Al na barreira é praticamente inexistente e o resultado é semelhante ao do GaAs “bulk”. Na Figura 6 apresentamos a variação da energia E_M , obtida com potência de $2,0 \text{ W/cm}^2$, em função da concentração de Al. O valor desta energia tem sido usado na literatura como uma estimativa da energia de localização do éxciton. Adicionalmente, observa-se na Figura 5 que a temperatura do ponto máximo do “blue-shift”, T_M , desloca-se para valores menores à medida que diminui a concentração de Al. Comportamento semelhante foi observado em ligas de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [26] e em QWs $\text{GaAs}/\text{GaAsSbN}$ [20], onde o material do poço é uma liga quaternária que apresenta alta magnitude das flutuações do potencial e o material da barreira é o binário GaAs.

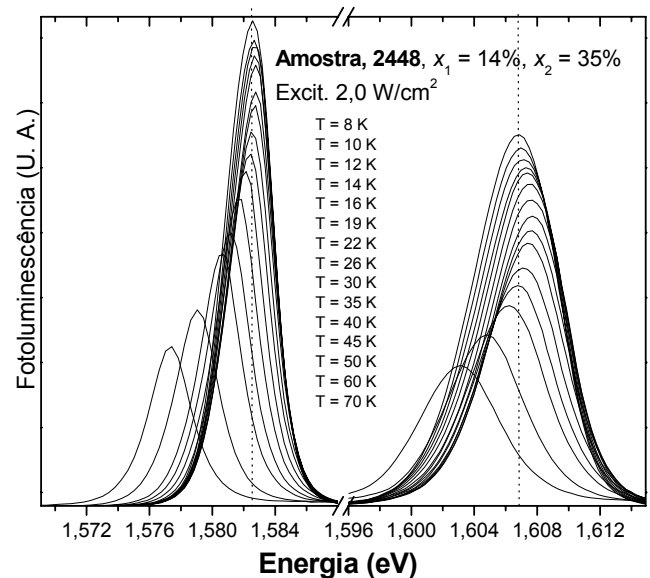


Figura 4 – Espectros de PL dos dois poços da amostra #2448 obtidos em diferentes temperaturas. Comportamento semelhante porém de menor intensidade, também, foi observado nas outras amostras. O erro estimado na determinação dos pontos é de $\approx 0,2 \text{ meV}$.

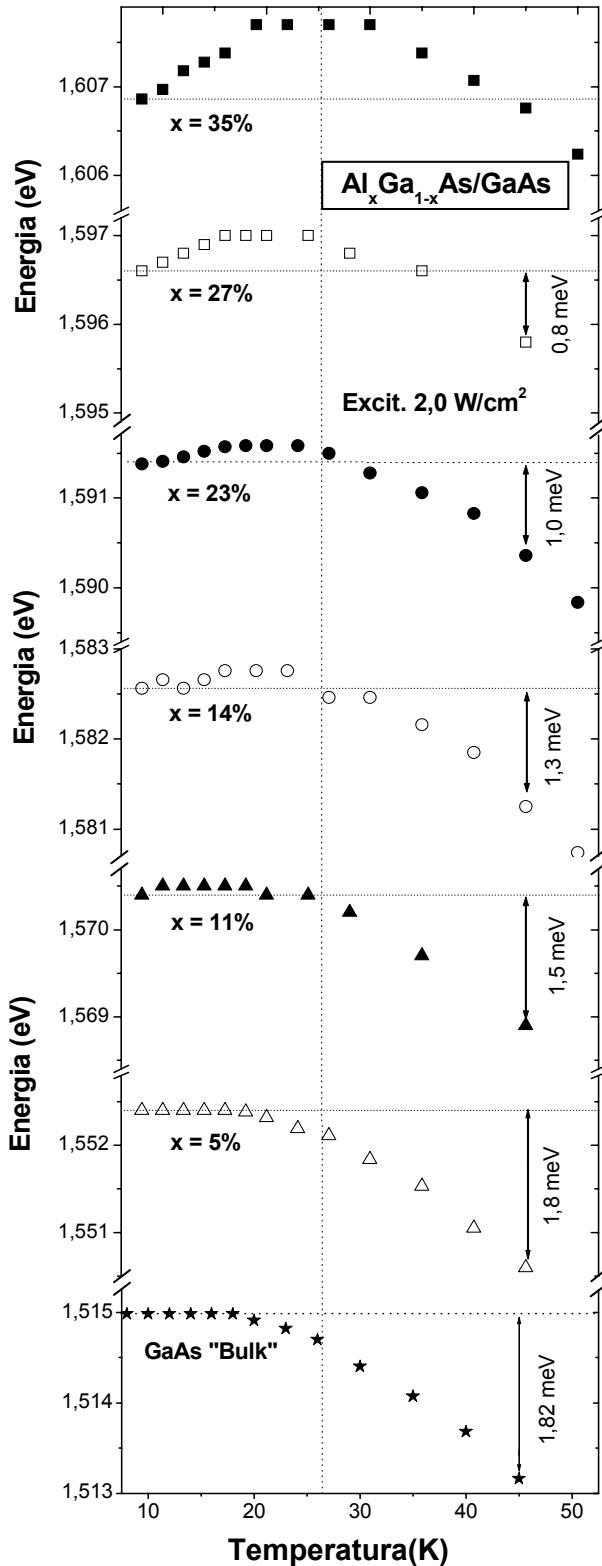


Figura 5 – Comportamento do pico de PL em função da temperatura em poços quânticos de AlGaAs/GaAs para diferentes concentrações de alumínio na barreira sob mesma intensidade de excitação. A intensidade de excitação de $2,0 \text{ W/cm}^2$ foi o menor valor encontrado que nos permitiu obter os espectros de PL de todas as amostras entre as temperaturas de $8 \text{ K} \leq T \leq 45 \text{ K}$ com intensidade adequada para detecção da luminescência.

Runge e Zimmermann [12] investigaram cuidadosamente sistemas que apresentam desde desordem fraca até desordem intermediária. No caso de desordem “intermediária”, como é o caso do sistema InGaAs/GaAs [13], InGaP/GaAs [14] ou da liga AlGaIn [26], o tempo de vida finito do éxciton deve ser considerado na análise da forma de linha de PL. Assim temos uma competição entre o decaimento radiativo e a energia de relaxação do éxciton devido ao espalhamento por fônons na presença de variação da energia local. Isto leva a um comportamento “anômalo” da dependência de E_{PL} com T conhecido na literatura como comportamento do tipo-S (devido à similaridade entre a curva da dependência da $E_{\text{PL}}(T)$ com a forma de um S). Em baixa temperatura, esta competição leva a uma relaxação incompleta dos éxcitons, que são somente parcialmente termalizados (éxcitons localizados nos potenciais mínimos locais) e a uma dependência não monotônica de E_{PL} com T . Em sistemas onde as amplitudes das flutuações são baixas (sistemas com baixa desordem, como é o caso dos QWs de AlGaAs/GaAs) a termalização é completa. Com o aumento da temperatura (a partir de $T = 8 \text{ K}$) os éxcitons são transferidos termicamente para estados de maior energia no rabo da banda até atingir a borda da banda de condução, deslocando E_{PL} em direção a maiores energias (“blue-shift”). Na Figura 7 apresentamos um modelo ilustrativo das flutuações do potencial e da forma de linha característica dos espectros de PL de tais sistemas. Com um incremento ainda maior na temperatura, a energia térmica vence a energia de localização excitônica e a forma de linha do espectro de PL torna-se uma forma de linha característica de éxcitons livres (FE), dando início ao “red-shift” característico da dependência do “gap” de energia dos materiais semicondutores com T . Embora este modelo microscópico proposto por Runge e Zimmermann seja o modelo mais completo atualmente, ele fornece *somente soluções numéricas e nenhuma expressão analítica para comparação com os resultados experimentais foi obtida*.

Como dito anteriormente, o aumento da concentração de alumínio na barreira aumenta as flutuações da composição química da liga, induzindo maiores amplitudes das flutuações do potencial. Assim, a penetração da função de onda excitônica na região da barreira faz com que estes se tornem mais susceptíveis a tais imperfeições, o que reforça os efeitos destas sobre os espectros ópticos. Nossos resultados experimentais mostram, portanto, que os comportamentos previstos teoricamente por Runge e Zimmermann são sistematicamente reforçados nas amostras de AlGaAs/GaAs com maior concentração de alumínio na barreira.

A Figura 8 mostra as energias dos picos de PL da amostra 2448 ($x_1 = 0,14$; $x_2 = 0,35$) para duas diferentes intensidades de excitação $0,4 \text{ W/cm}^2$ e $2,0 \text{ W/cm}^2$. Os comportamentos observados nas figuras anteriores, na potência de $2,0 \text{ W/cm}^2$, são reforçados quando a potência de excitação é reduzida, isto é, o valor do “blue-shift” aumenta e a posição da energia E_{M} desloca para maiores temperaturas. Para o poço com $x = 0,35$; o valor máximo do “blue-shift” ocorre em $T = 27$ para $0,4 \text{ W/cm}^2$ e $T = 24 \text{ K}$ para $2,0 \text{ W/cm}^2$.

Como a densidade de estados da “band-tail” é finita, com o aumento da intensidade de excitação ocorre um preenchimento gradual dos estados de menor energia no “band-tail”.

Este efeito é responsável pela redução do “blue-shift” observado na Figura 8. Para intensidades de excitação suficientemente altas, as transições relacionadas com os estados da “band-tail” saturam e a recombinação de FE torna-se mais eficiente. Assim, a intensidade relativa das recombinações de FE continua a aumentar com o incremento na densidade de excitação e o “blue-shift” do pico de PL satura. Essas tendências são confirmadas em nossas amostras.

Adicionalmente, verifica-se da Figura 5 que o aumento no valor do “blue-shift” e o deslocamento do “blue-shift” para maiores temperaturas, à medida que se aumenta a magnitude das flutuações do potencial, fazem com que a redução da energia do pico de PL entre as temperaturas de 8 K e uma determinada temperatura (maior que a região de temperatura onde ocorre o “blue-shift” – no nosso caso 45 K) seja *menor*. Isto se deve a competição entre o “blue-shift”, causado pela localização do éxciton, e o “red-shift” causado pela variação tradicional da energia de gap dos materiais semicondutores com a temperatura (interação elétron-fônon (IEF) e a expansão térmica da rede (ETR)). No caso do GaAs “bulk”, observa-se que a variação da E_{PL} é causada somente pela IEF e pela ETR. Este resultado mostra claramente que a análise da dependência da energia de “gap” com a temperatura em ligas ou da energia fundamental com T em heteroestruturas, que possuem uma liga seja na região do poço ou na região da barreira, deve ser realizada com potencia de excitação adequada para inibir os efeitos da localização excitônica quando se usa a técnica de PL. Amostras que apresentem flutuações do potencial com magnitudes ainda maiores que as apresentadas aqui devem mostrar uma estabilidade da energia do pico de PL ainda mais expressivo.

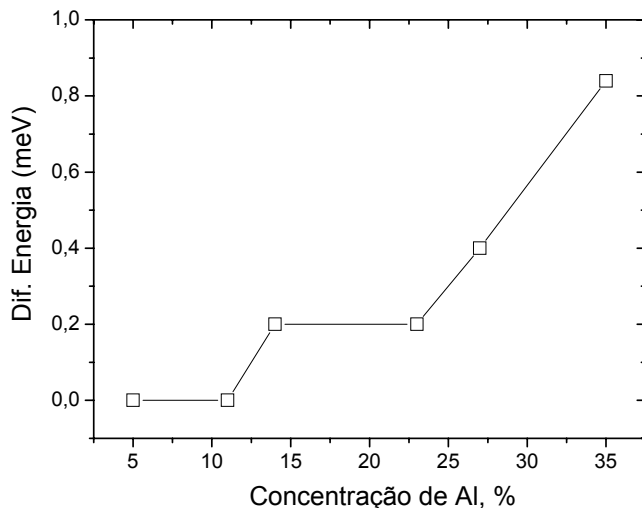


Figura 6 – Dependência da energia E_M com a composição de alumínio na barreira.

4. CONCLUSÃO

A variação da energia do pico de PL (E_{PL}) com a temperatura apresenta um “blue-shift” na região de baixas temperaturas (9 – 30 K) e um “red-shift” para temperaturas superiores. Neste ultimo intervalo de temperatura, o comportamen-

to da E_{PL} com T acompanha o comportamento tradicional da dependência do “gap” de energia com T dos materiais semicondutores III-V. O valor máximo do “blue-shift” é sistematicamente reforçado e deslocado para maiores temperaturas à medida que se aumenta a concentração de alumínio na barreira, indicando um forte efeito do Al no grau de desordem do material constituinte da barreira e/ou da interface, provavelmente devido a uma maior interdifusão nas regiões das interfaces. Adicionalmente, observa-se que todos estes comportamentos são reforçados com a redução da intensidade de excitação.

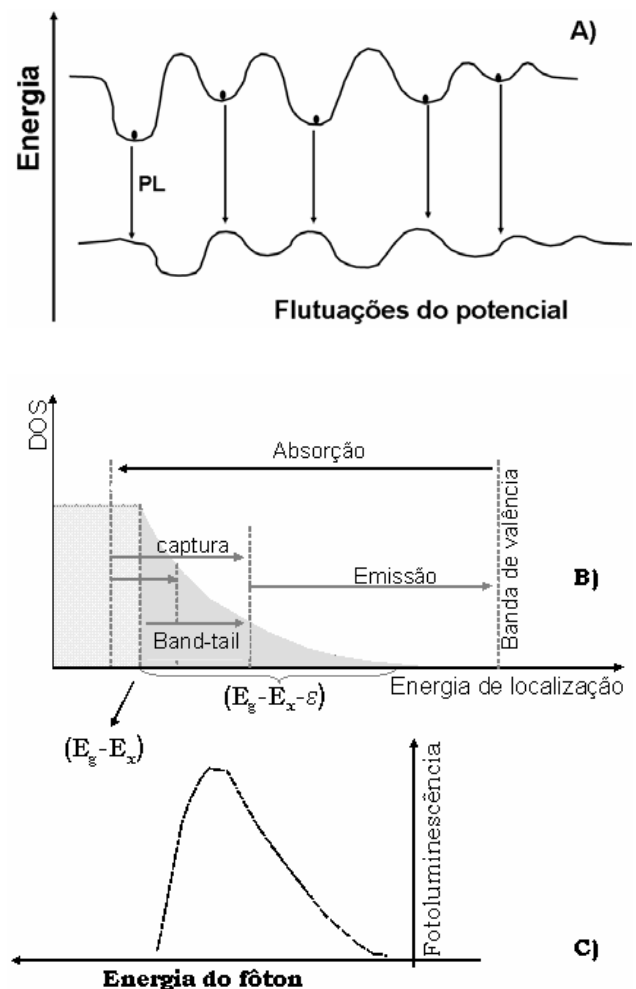


Figura 7 – A) Representação esquemática das flutuações do potencial. Os éxcitons estão localizados quando a energia térmica $K_B T$ é menor que as barreiras de potencial geradas pelas flutuações. Neste caso os éxcitons estão presos em um mínimo local.

B) A densidade de estados bidimensional com um rabo exponencial que reflete as flutuações do potencial ao longo do plano (x,y) do poço e das flutuações da composição química da liga, onde E_g é a energia (n1-hh1) no poço, E_x é a energia de ligação do éxciton e ε é a energia de localização. C) Forma de linha característica dos espectros de PL.

A assimetria observada nos espectros de PL, para baixas temperaturas e baixas intensidades de excitação, o “blue-shift” e o deslocamento do máximo do

“blue-shift” para maiores temperaturas, observado em amostras com maior concentração de Al, são explicados pela competição entre recombinações radiativas envolvendo excitons localizados no “band-tail” da DOS e excitons delocalizados no estado fundamental do poço quântico. O aumento da concentração de alumínio na barreira aumenta a flutuação da composição química da liga. Assim, a penetração da função de onda excitônica na região da barreira faz com que os portadores se tornem mais susceptíveis à tais imperfeições, o que reforça os efeitos destas imperfeições sobre os espectros ópticos.

Como a largura nominal dos poços, analisados aqui, são iguais, acreditamos que o aumento no valor da FWHM e no valor do “blue-shift” são principalmente devido as flutuações da composição da liga da barreira e não das flutuações da largura do poço. Estes resultados mostram que a composição do material da barreira, AlGaAs, atua de forma sistemática sobre os espectros de PL dos QWs de AlGaAs/GaAs reforçando os comportamentos previstos teoricamente por Zimmerman e em concordância com resultados teóricos apresentados recentemente por Ponomarev e colaboradores [22].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (Fundação Araucária) e Fundação Banco do Brasil (FBB).

REFERÊNCIAS

1. SINGH, J.; BAJAJ, K.K., *J. Appl. Phys.* 57 (1985) 5433.
2. OUADJAOUD, D.; MARFAING, Y., *Phys. Rev. B* 46 (1992) 7908.
3. AÏT-OUALI, A.; BREBNER, J.L.; YIP, R.Y. -F., MASUT, R.A., *J. Appl. Phys.* 86 (1999) 6803.
4. BRUNNER, K.; ABSTREITER, G.; BOHM, G.; TRANKLE, G.; WEIMANN, G., *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 3320.
5. GAMMON, D.; SNOW, E.S.; KATZE, D.S., *Appl. Phys. Lett.* 67 (1995) 2391.
6. HESS, H.F.; BETZIG, E.; HARRIS, T.D.; PFEIFFER L.N.; WEST, K.W., *Science* 264 (1994) 1740.
7. JAHN, U.; KWOK, S.H.; RAMSTEINER, M.; HEY, R.; GRAHN, H.T.; RUNGE, E., *Phys. Rev. B* 54 (1996) 2733.
8. RAMSTEINER, M.; HEY, R.; KLANN, R.; JAHN, U.; GORBUNOVA, I.; PLOOG, K.H., *Phys. Rev. B* 55 (1997) 5239.
9. DELALANDE, C.; MEYNADIER, M.H.; VOOS, M., *Phys. Rev. B* 31 (1985) 2497.
10. GURIOLI, M.; VINATTIERI, A.; MARTINEZ-PASTOR, J.; COLOCCI, M., *Phys. Rev. B* 50 (1994) 11817.
11. POLIMENI, A.; PATANÉ, A.; ALESSI, M.G.; CAPIZZI, M.; MARTELLI, F.; BASACCHI, A.; FRANCHI, S., *Phys. Rev. B* 54 (1996) 16389.
12. RUNGE, E.; ZIMMERMANN, R., *Adv. Solid. State Phys.* 38 (1998) 251.
13. GRASSI, M.; FRAGANO, A.F.; PATANÉ, A.; CAPAZI, M.; RUNGE, E.; ZIMMERMANN, R., *Phys. Rev. B* 61 (2000) 10985, e suas referências.
14. LAURETO, E.; MENESES, E.A.; CARVALHO JR, W.; BERNUSSI, A.A.; RIBEIRO, E.; SILVA, E.C.F.; OLIVEIRA, J.B.B., *Brazilian J. Phys.* 32 (2002) 314.
15. BUYANOVA, I.A.; CHEN, W.M.; POZINA, G.; BERGMAN, J.P.; MONEMAR, B.; XIN, H.P.; TU, C.W., *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 501.
16. POLIMENI, A.; CAPIZZI, M.; GEDDO, M.; FISCHER, M.; REINHARDT, M.; FORCHEL, A., *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000) 2870.

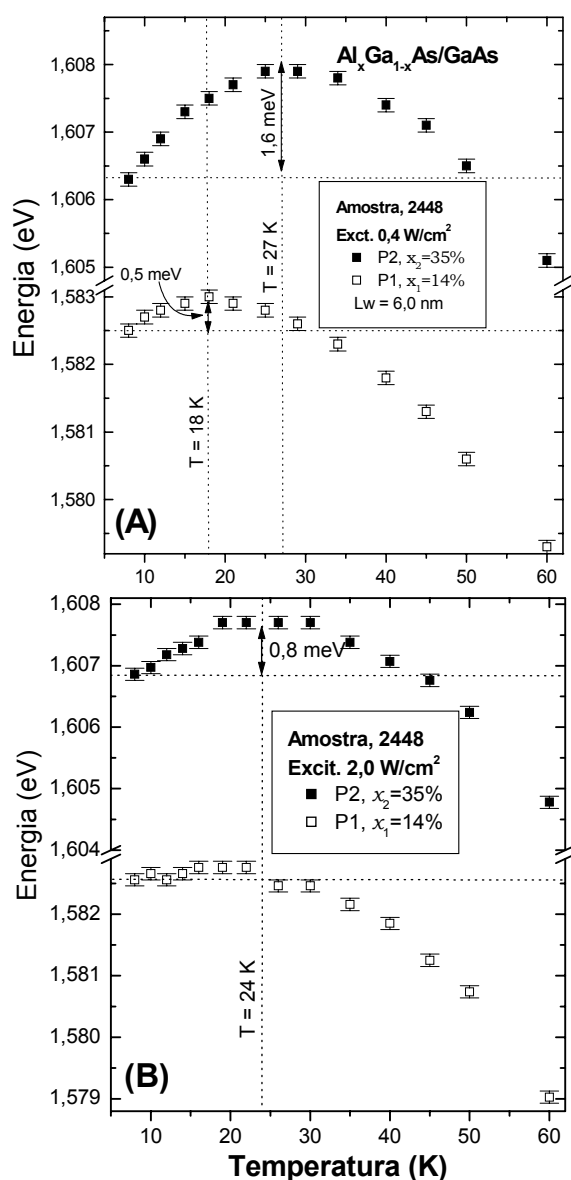


Figura 8 – Variação da posição do máximo da PL em função da temperatura relacionada com os estados fundamentais (n1-hh1) dos dois poços da amostra 2448 para duas diferentes potências de excitação 0,4 W/cm² (Fig. A) e 2,0 W/cm² (Fig. B). Esta amostra consiste de dois poços de mesma largura, 60 Å, com diferentes concentrações de alumínio na barreira, x = 14% e 35%.

17. LOURENÇO, S.A.; DIAS, I.F.L.; POÇAS, L.C.; DUARTE, J.L.; OLIVEIRA, J.B.B.; HARMAND, J.C., *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 4475.
18. KASCHNER, A.; LUTTGERT, T.; BORN, H.; HOFFMANN, A.; EGOROV, A. Y.; RIECHERT, H., *Appl. Phys. Lett.* 78 (2001) 1391.
19. TOGINHO FILHO, D.O.; DIAS, I.F.L.; LAURETO E.; DUARTE J.L.; LOURENÇO, S.A.; POÇAS, L.C.; PRABHU, S.S.; KLEM, J., *J. Appl. Phys.* 73 (2005) 123702.
20. LOURENÇO, S.A.; DIAS, I.F.L.; DUARTE, J.L.; HARMAND, J.C., "Temperature-dependent photoluminescence spectra of $\text{GaAsSb}/\text{AlGaAs}$ and $\text{GaAsSbN}/\text{GaAs}$ single quantum wells under different excitation intensities" (submetido para publicação).
21. BERTOLET, D.C.; HSU, J.-K.; LAU, K.M.; KOTELES, E.S.; OWENS, D., *J. Appl. Phys.* 64 (1988) 6562.
22. PONOMAREV, I.V.; DEYCH, L.I.; LISYANSKY, A.A., *Phys. Rev. B* 71 (2005) 155303.
23. LOURENÇO, S.A.; DIAS, I.F.L.; DUARTE, J.L.; LAURETO, E.; TOGINHO FILHO, D.O.; MENESES, E.A.; LEITE, J.R., *Eur. Phys. J. B* 2 (2001) 11.
24. LOURENÇO, S.A.; DIAS, I.F.L.; DUARTE, J.L.; LAURETO, E.; IWAMOTO, H.; MENESES, E.A.; LEITE, J.R., *Superlattice and Microstructures* 29 (2001) 225.
25. LOURENÇO, S.A.; DIAS, I.F.L.; DUARTE, J.L.; LAURETO, E.; MENESES, E.A.; LEITE, J.R.; MAZZARO, I., *J. Appl. Phys.* 89 (2001) 6159.
26. BELL, A.; SRINIVASON, S.; PLUMLE, C.; OMIYA, H.; E PONCE, A.F., *J. Appl. Phys.* 95 (2004) 4670.