

## Apresentação e Análise dos Resultados

### 4.1 Análise da estrutura InAs/InP

Esta secção tem como objetivo analisar os parâmetros de crescimento de PQs de InAs sobre InP, são eles: 1- substrato, 2- tempo de crescimento, 3- temperatura, 4- fluxo de In. Descreveremos as características de pontos quânticos auto-organizados de InAs sobre InP nucleados pela técnica Stranski-Krastanov. As amostras crescidas foram obtidas por *metalorganic vapor phase epitaxy* e caracterizadas por microscopia de força atômica.

#### 1- Substrato

Diferentes substratos foram utilizados a fim de se compreender os mecanismos de formação dos pontos quânticos e escolher um substrato que melhor se adeque para a obtenção de uma elevada densidade dessas nanoestruturas.

Dentro do reator de crescimento epitaxial foram colocados quatro tipos diferentes de substratos de InP, arrançados conforme a figura 4.1. Os quatro pedaços de substrato utilizados foram: 1- Sumitomo InP:Fe 2° off (2° off significa que o substrato recebeu um corte de dois graus em relação à direção (100)), 2- Inpact InP:Fe (100), 3- Inpact InP:Fe (100) 2° off, 4- Inpact:S (100). Desta forma foi possível estudar o papel do substrato na formação dos PQs utilizando exatamente as mesmas condições de crescimento. O crescimento foi feito a uma pressão de 50 mbar com um fluxo de In de 60 sccm. Primeiramente uma camada tampão de InP de 200 nm foi depositada a 630°C. A fonte de In foi fechada, e em seguida, houve troca dos fluxos de fosfina e arsina enquanto a temperatura baixava até 500°C. Neste instante, a fonte de In foi novamente acionada de forma a nuclear os PQs de InAs. Três segundos após, a fonte de In foi desligada a fim de interromper o crescimento.

Utilizando a técnica de microscopia de força atômica (AFM) verificou-se a homogeneidade na densidade planar de PQs por toda a amostra, depois para quadrados de 5 x 5 µm e finalmente para quadrados de 2 x 2 µm. A contagem desses PQs foi feita manualmente em quadrados de 2 x 2 µm. Para se estudar as

alturas dos PQs foram feitos vários histogramas de altura através de um programa chamado Image Tool.

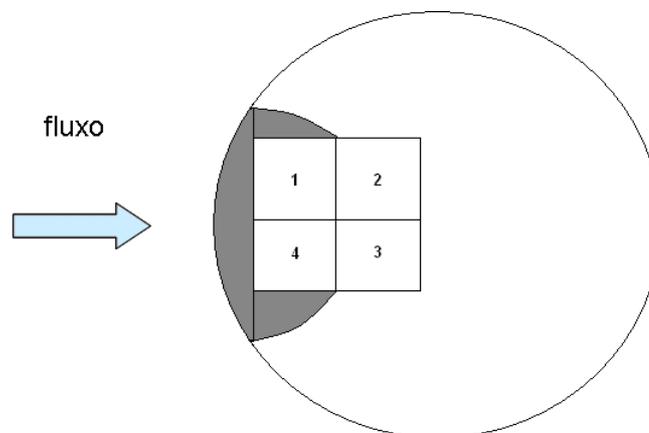


Figura 4.1 – Desenho esquemático da posição dos substratos abaixo discriminados com relação ao suscepter e ao fluxo do reator: 1- Sumitomo InP:Fe  $2^0$  off, 2- Inpact InP:Fe (100), 3- Inpact InP:Fe (100)  $2^0$  off, 4- Inpact InP:S (100).

A figura 4.2 mostra as micrografias de AFM obtidas dos PQs crescidos sobre os quatro substratos. A partir dos histogramas feitos nessas imagens o gráfico da figura 4.3 foi elaborado. Nele tem-se a densidade planar *versus* a altura para os quatro diferentes substratos. A maior densidade planar foi alcançada para o substrato 1 direção (100) da empresa Sumitomo. A densidade planar para os substratos 2, 3 e 4 da Inpact está muito abaixo da densidade do substrato 1 indicando que a densidade varia não devido à posição do substrato no suscepter mas sim ao tipo de substrato. Analisando as barras de erro (gerada pelo desvio padrão da altura), tem-se que as alturas são extremamente próximas independentes do fabricante e da direção cristalina do substrato. Observa-se que a variância na altura, por outro lado, é bastante sensível à mudança de dopante no substrato, caso do substrato 4 (Inpact InP:S), para o 2 (Inpact InP:Fe) ambos na mesma direção cristalográfica (100). A presença de dopantes no substrato não influenciou os resultados de densidade.

Os substratos, crescidos pela técnica Liquid Encapsulated Czochralski possuem uma elevada densidade de discordâncias. Este é o motivo para primeiramente se crescer epitaxialmente uma camada dita tampão, do mesmo material do substrato, de forma a melhorar a qualidade cristalina, evitando a

propagação de grande parte das discordâncias. Com isso obtém-se um material de melhor qualidade cristalina. A fim de avaliar o papel da presença das discordâncias na nucleação dos PQs, foram crescidas duas amostras de PQs: uma diretamente sobre o substrato de InP e outra sobre uma camada tampão, ambas com o substrato da Sumitomo InP:Fe (100). Os resultados obtidos se encontram na figura 4.4.

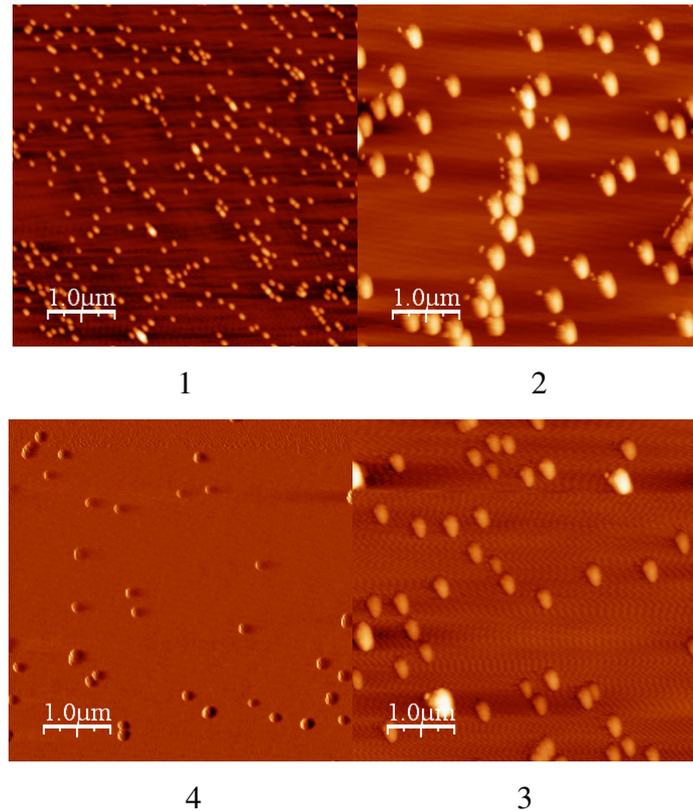


Figura 4.2 Imagens de AFM referentes às amostras crescidas sobre os 4 diferentes substratos mostrados na figura 4.1.

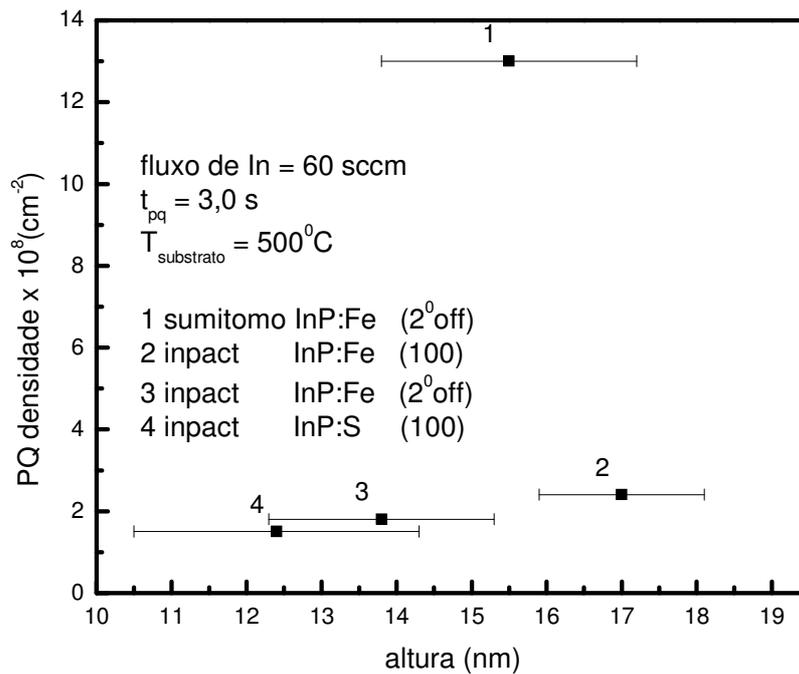
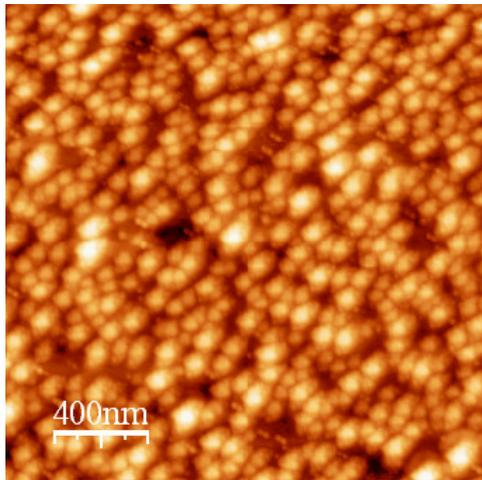


Figura 4.3 – Densidade planar versus a altura dos PQs, para efeito de comparação de substratos nas seguintes condições: fluxo de In = 60 sccm e  $t_{pq} = 3,0s$ .

Observa-se na figura 4.4b e d que a densidade de PQs é quase duas ordens de grandeza maior para a amostra na qual os PQs foram depositados diretamente sobre o substrato. Isto nos leva a concluir que a presença de defeitos [49] como discordâncias favorece a nucleação de PQs. Esses defeitos cristalinos agem como sítios de nucleação dos PQs. Com este resultado podemos voltar à análise dos resultados obtidos sobre diferentes substratos. O fato da amostra crescida sobre substrato da Sumitomo apresentar uma maior densidade de PQs pode indicar que este substrato possui uma maior densidade de discordâncias. Os fabricantes forneceram os seguintes dados em relação à densidade de discordâncias: Sumitomo superior ( $\leq 5 \times 10^4 \cdot \text{cm}^{-2}$ ) a empresa Inpact ( $< 3 \times 10^4 \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Apesar das informações fornecidas pelos fabricantes não serem conclusivas, pode-se afirmar que elas não invalidam a conclusão de que o substrato da Sumitomo deve apresentar uma maior densidade de discordâncias.

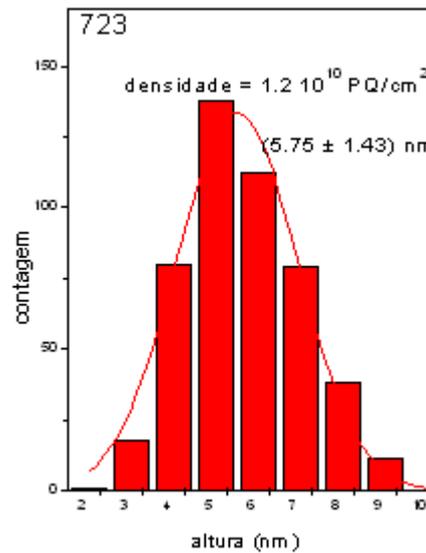
Concluindo, os resultados apresentados indicam que a presença de defeitos cristalinos no substrato, como discordâncias, favorecem a nucleação de PQs. Comparando os fabricantes Inpact e Sumitomo, o segundo gerou amostras com

uma maior densidade de PQs. A presença de dopantes no substrato não influenciou os resultados de densidade.

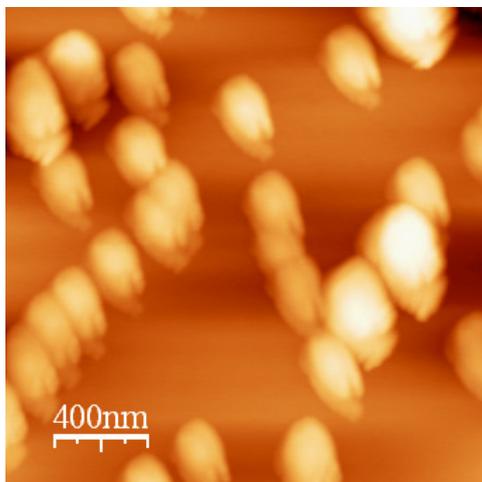


723 sem camada tampão

(a)

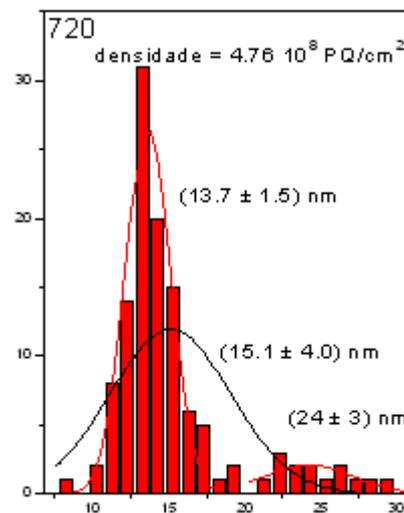


(b)



720 com camada tampão

(c)



(d)

Figura 4.4 – Micrografia de AFM e histograma de altura para as amostras 723 (com camada tampão) e 720 (sem camada tampão) onde: (a) micrografia de AFM da amostra 723; (b) histograma de altura da amostra 723; (c) micrografia de AFM da amostra 720; (d) histograma de altura da amostra 720.

## 2- Tempo de crescimento

Na figura 4.5, tem-se um gráfico da densidade planar *versus* a altura dos PQs para as amostras crescidas de InAs/InP utilizando diferentes condições de crescimento, tais como: fluxo de In, temperatura de deposição dos PQs e tempo de crescimento. Observa-se nesta figura que a maior densidade de PQs é obtida para um fluxo de In de 60 sccm, uma temperatura de deposição de 520°C e tempo de crescimento de 4.2 s, dados marcados com  $\Delta$  azul. No caso de amostras crescidas com o mesmo fluxo de In, mas a uma temperatura de 500°C, dados marcados com  $\nabla$  azul, também se observa um máximo na densidade de PQs para um tempo de 4.2 s.

A fim de facilitar a análise dos resultados, deve-se analisar a densidade de PQs e sua altura em função de cada parâmetro de crescimento individualmente. Na figura 4.6 tem-se o gráfico da densidade planar de PQs *versus* o tempo de crescimento. Primeiro é possível observar que para um fluxo de 60 sccm e temperatura de 520°C (dados marcados com  $\Delta$  azul) a densidade de PQs é muito sensível ao tempo de crescimento. Em outras palavras, observa-se uma variação grande na densidade para uma pequena mudança no tempo. Isto indica que apesar dessas condições de crescimento fornecerem PQs com características mais adequadas ao objetivo do trabalho, o controle do crescimento é sutil. Para um fluxo de In de 30 sccm (dados marcados com  $\Delta$  e  $\nabla$  vermelhos) observa-se que há necessidade de se utilizar tempos superiores a 5 s para que uma densidade adequada de PQs seja atingida. Um melhor controle sobre a densidade em função do tempo se obtém para um fluxo de 60 sccm e uma temperatura de crescimento de 500°C (dados marcados com  $\nabla$  azul). Porém nesta temperatura não se consegue atingir uma densidade adequada de PQs. Pode-se ainda no mesmo gráfico observar que mesmo para um fluxo de 72 sccm a temperatura de 500°C é um fator limitante, uma vez que a densidade obtida não atinge  $6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ .

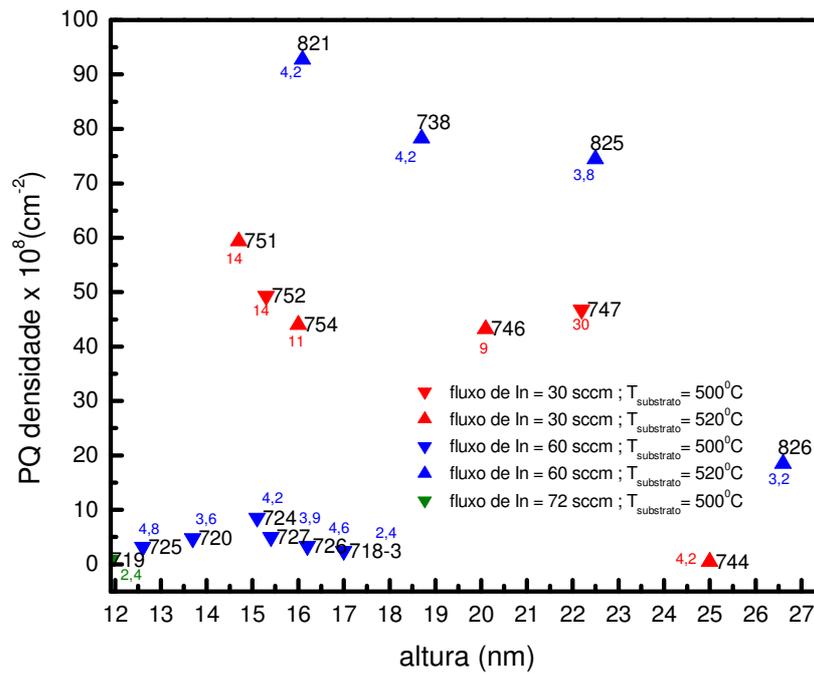


Figura 4.5 – Densidade planar versus a altura dos PQs, para efeito de comparação das diferentes condições de fluxo, temperatura e tempo de crescimento.

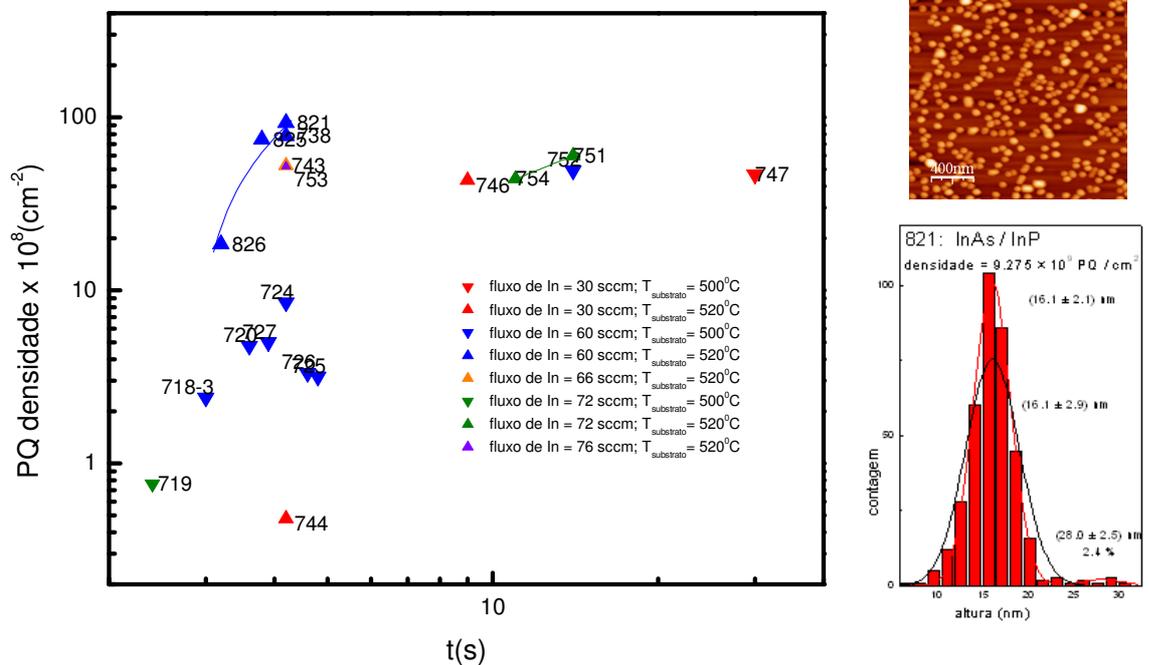


Figura 4.6 – Densidade planar versus o tempo de crescimento dos PQs para as seguintes condições: fluxo de In = 30, 60, 66, 72 e 78 sccm e  $T_{\text{substrato}} = 500$  e  $520^\circ\text{C}$ .

A figura 4.7 mostra como varia a altura dos PQs em função do tempo de crescimento. De forma geral, por conservação de massa, para uma mesma quantidade de material, à medida que aumenta a densidade de PQs, o seu volume deve diminuir. Considerando-se a hipótese de que se o volume do PQ diminui todas as suas dimensões também diminuem, então sua altura deve diminuir. Comparando-se o gráfico da figura 4.7 com o anterior, observa-se que para todas as condições de crescimento, têm-se uma diminuição na altura dos PQs concomitante com um aumento na densidade de PQs, conforme esperado pela conservação da massa.

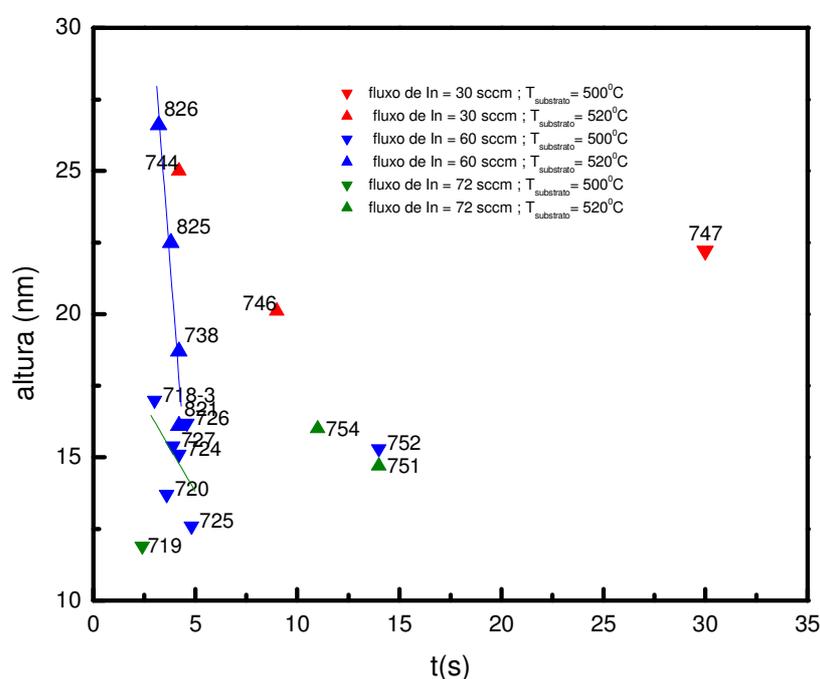


Figura 4.7 – Gráfico de altura versus o tempo de crescimento dos PQs nas seguintes condições: fluxo de In = 30, 60 sccm e  $T_{\text{substrato}} = 500^{\circ}\text{C}$ ,  $520^{\circ}\text{C}$ .

### 3- Temperatura

Na figura 4.8 tem-se um gráfico da densidade de pontos quânticos *versus* temperatura de deposição dos PQs para amostras crescidas com um fluxo de 60 sccm e durante um tempo de deposição de 4.2 s. Estes dois últimos parâmetros foram escolhidos porque de acordo com a análise feita no item anterior e

conforme a figura 4.5 fornecem a maior densidade de PQs. A densidade planar de PQs máxima alcançada foi de  $9,2 \times 10^9$  PQs/cm<sup>2</sup> para a temperatura de crescimento de 520<sup>o</sup>C. Observa-se que para temperaturas superiores a 520<sup>o</sup>C a densidade diminuiu. Este fenômeno está possivelmente ligado ao fato da velocidade dos átomos na superfície de crescimento ser mais elevada a temperaturas superiores, permitindo que os átomos atinjam sítios de nucleação de PQs já existentes, ao invés de nuclearem novos PQs. Isto indica que os PQs devem ser maiores a temperaturas mais elevadas. De fato, observa-se um ligeiro aumento na altura dos pontos quânticos com o aumento da temperatura de crescimento. Para temperaturas inferiores a 520<sup>o</sup>C há uma redução na densidade de pontos quânticos. Isto mostra que a nucleação de pontos quânticos para este intervalo de temperatura é termicamente ativado. Os resultados aqui apresentados indicam que para temperaturas inferiores a 520<sup>o</sup>C o processo de nucleação de PQs é limitado por temperatura, ao passo que para temperaturas superiores ele é limitado pela cinética dos elementos.

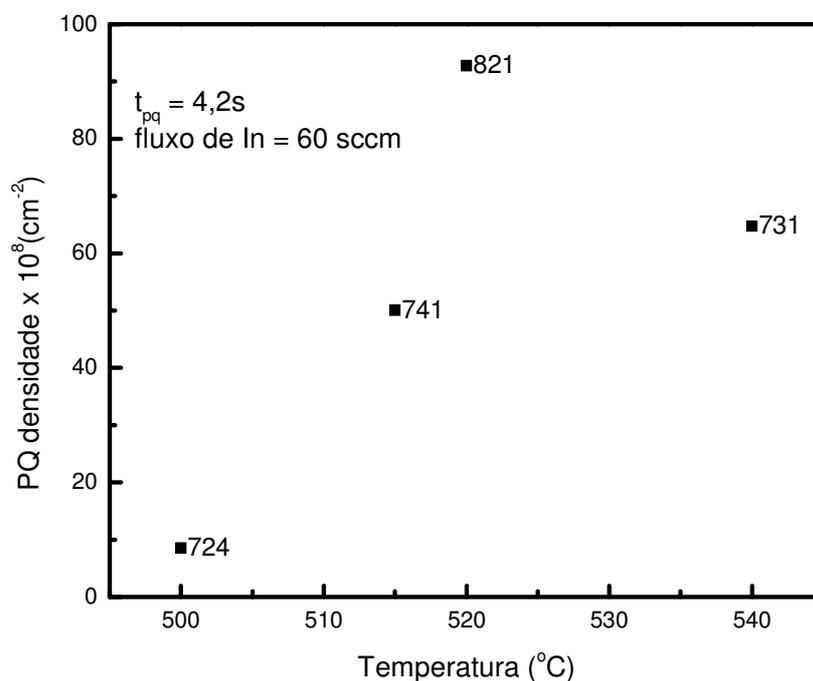


Figura 4.8 – Gráfico de densidade planar de PQs versus a temperatura para as seguintes condições:  $t_{pq} = 4,2s$  e fluxo de In = 60 sccm.

#### 4- Fluxo de In

O fluxo de In durante a deposição dos PQs é que determina a taxa de crescimento dos PQs. A figura 4.9 mostra como varia a densidade de PQs em função do fluxo de In. As outras condições de crescimento foram escolhidas em função dos melhores resultados obtidos, conforme discutido nos itens anteriores. Observa-se que a densidade de PQs máxima é atingida para um fluxo de 60 sccm. Para um fluxo de 30 sccm a densidade de PQs é cerca de duas ordens de grandeza inferior. Aqui o número de sítios de nucleação está limitado pela quantidade de material fornecida. Para um fluxo de 66 sccm a densidade de PQs inesperadamente diminui. Porém, notamos que a altura dos PQs aumenta, conforme ilustra a figura 4.10. De qualquer maneira, não haveria, em princípio, motivo para uma redução dos sítios de nucleação. De fato, poderia haver tanto um aumento na densidade quanto na altura dos PQs. A queda na densidade possivelmente ocorre em função do início do fenômeno de coalescência, ou seja, PQs adjacentes se juntam para formar PQs maiores. Este fluxo entre 60 e 66 sccm deve ser o limiar para a coalescência. Esta coalescência leva, sobretudo à formação de PQs com área de base bem maior.

Para fluxos ainda superiores este fenômeno de coalescência prevalece. Isto é observado nos dados das figuras 4.9 e 4.10 para um fluxo de 76 sccm. Para este fluxo, além de um declínio ainda maior na densidade dos PQs em função da coalescência, a altura dos PQs também diminui. Espera-se que para uma taxa de crescimento tão elevada e com a predominância da coalescência, os PQs ao se juntarem passem a ter uma forma mais achatada e menos piramidal, ou seja, uma forma com uma razão de aspecto (altura por raio da base) mais longe de um. Isto implica num aumento substancial da área da base desses PQs. Foi feita uma tentativa de se verificar esta conclusão. Para isso seria necessário determinar a área da base utilizando imagens de AFM. Porém, em função do tamanho dos PQs ser da mesma ordem de grandeza que a ponta do AFM ocorre uma convolução da ponta com o PQ, levando a uma imprecisão na medida do diâmetro da base. Por outro lado, comparando visualmente as micrografias de AFM das amostras 821 (60 sccm) e 753 (76 sccm) que estão na figura 4.11, observa-se um aumento no tamanho da base.

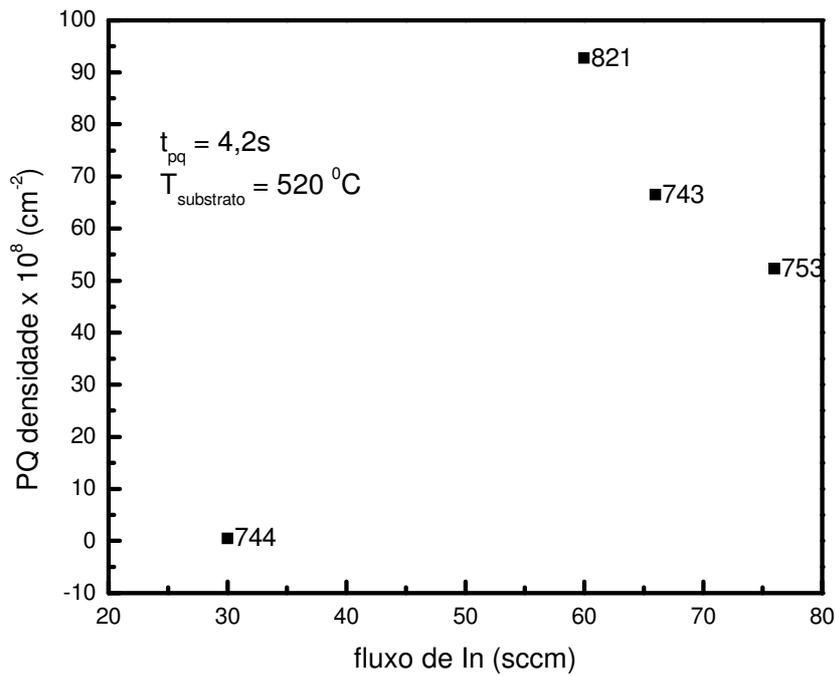


Figura 4.9 – Gráfico de densidade planar de PQs versus o fluxo de In para as seguintes condições:  $t_{pq} = 4,2s$  e  $T_{substrato} = 520^{\circ}C$

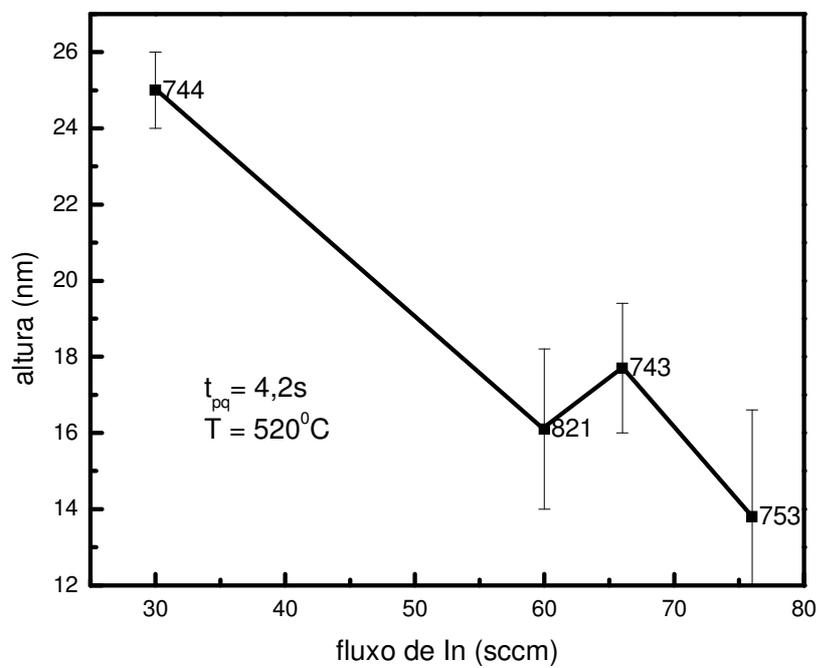


Figura 4.10 – Gráfico de altura de PQs versus o fluxo de In para as seguintes condições:  $t_{pq} = 4,2s$  e  $T_{substrato} = 520^{\circ}C$ .

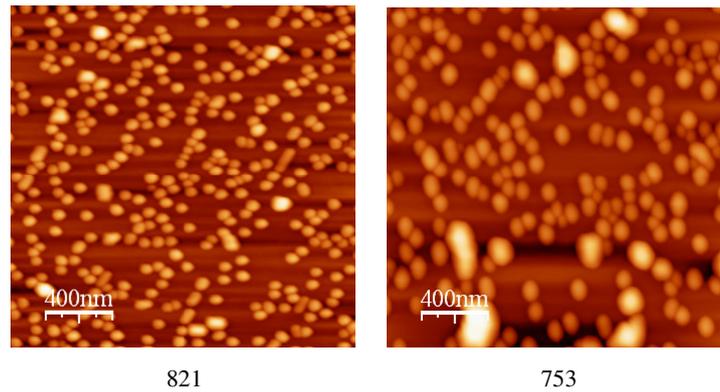


Figura 4.11 – Micrografia de AFM das amostras 821 (60 sccm) e 753 (76 sccm).

De acordo com o estudo realizado de pontos quânticos de InAs nucleados sobre InP para a obtenção de uma densidade de PQs elevada e de PQs de pequena altura deve-se utilizar um tempo de deposição de 4.2 s, uma temperatura do substrato de 520 °C, um recozimento de cerca de 12 s e um fluxo de In de 60 sccm.

## 4.2 Análise da estrutura InAs / InGaAs.

Esta seção tem dois objetivos, são eles: analisar os parâmetros de crescimento de PQs de InAs sobre InGaAs a fim de otimizar tais estruturas para a fabricação de fotodetectores para o infravermelho médio e avaliar o desempenho dos dispositivos confeccionados com estruturas otimizadas.

Primeiramente, camadas de pontos quânticos de InAs crescidos sobre InGaAs casado com InP serão avaliadas em relação às condições de crescimento. Em seguida, o papel da composição da liga do material ternário na nucleação dos pontos quânticos será avaliado. Finalmente, o desempenho de dispositivos fabricados com as melhores estruturas será apresentado.

### 1 – Pontos quânticos de InAs sobre InGaAs casado com InP .

Na seção anterior vimos que para PQs de InAs nucleados sobre InP um fluxo de 60 sccm, uma temperatura de 520°C e um tempo de crescimento de 4.2 s fornecia valores otimizados da densidade de PQs e de sua altura. Assim, partindo destes parâmetros de crescimento fizemos um ajuste fino do tempo de crescimento para este novo sistema InAs sobre InGaAs. A figura 4.12 mostra que a densidade de pontos quânticos é máxima para tempos em torno de 5.5 s, portanto, este tempo foi escolhido para o crescimento de uma série de amostras de pontos quânticos de InAs sobre InGaAs. Uma outra série foi crescida com um tempo de 3.5 s porque, conforme a figura 4.13, os pontos quânticos obtidos são menores. As energias eletrônicas para pontos quânticos menores se aproximam mais do contínuo, favorecendo o aproveitamento dos elétrons para a corrente elétrica em fotodetectores.

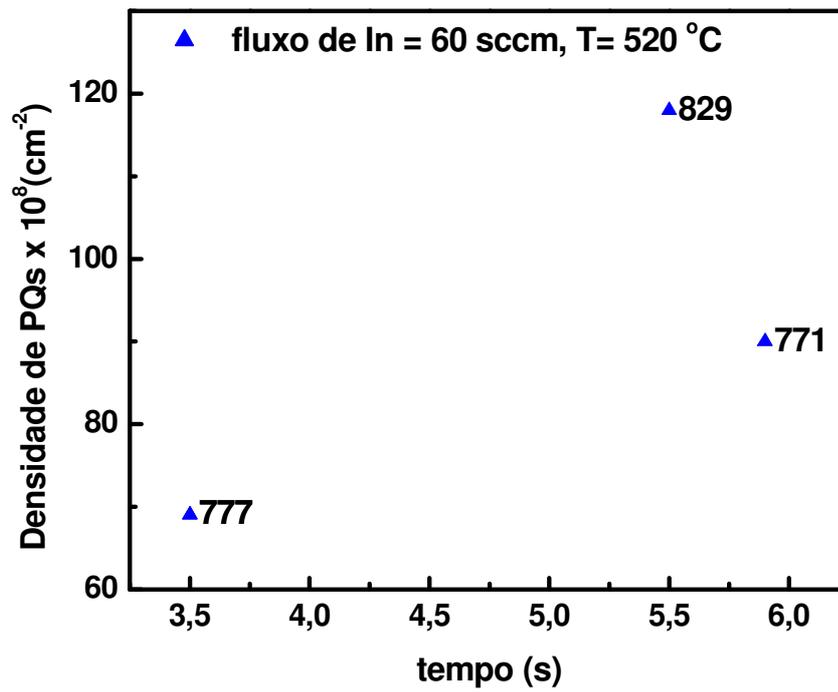


Figura 4.12 - Densidade de pontos quânticos *versus* o tempo utilizado no crescimento.

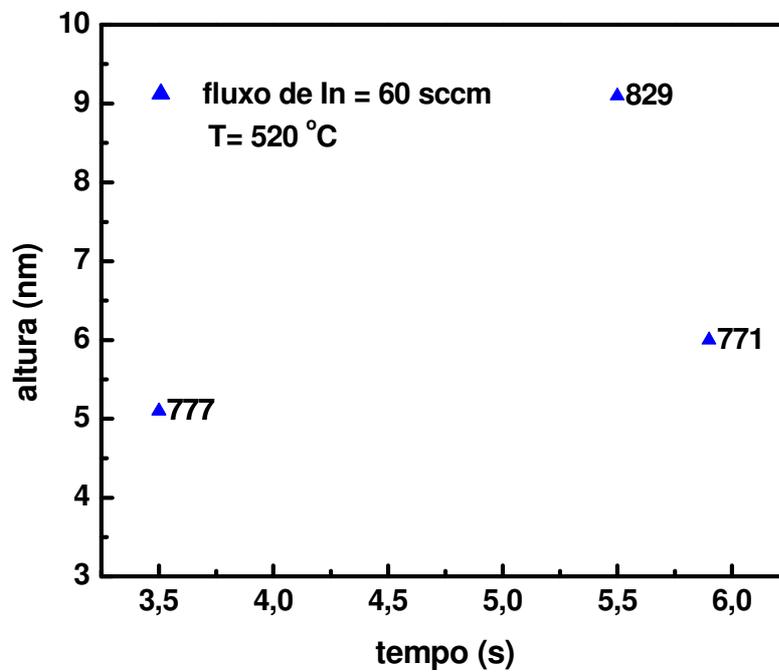


Figura 4.13 - Altura dos pontos quânticos *versus* o tempo utilizado no crescimento.

Na figura 4.14 observam-se os histogramas para duas amostras crescidas durante um tempo de 5.5 s e com um fluxo de TMI<sub>n</sub> de 60 sccm a duas temperaturas diferentes: 500°C e 520°C. A amostra crescida à temperatura mais elevada apresenta uma maior densidade e uma distribuição mais homogênea dos pontos quânticos. Nota-se no histograma que em temperaturas mais altas os pontos quânticos pequenos não são nucleados. Isto ocorre porque a temperatura sendo mais elevada a velocidade dos átomos na superfície é maior e assim os átomos conseguem alcançar sítios de nucleação já existentes ao invés de formar novos pontos quânticos.

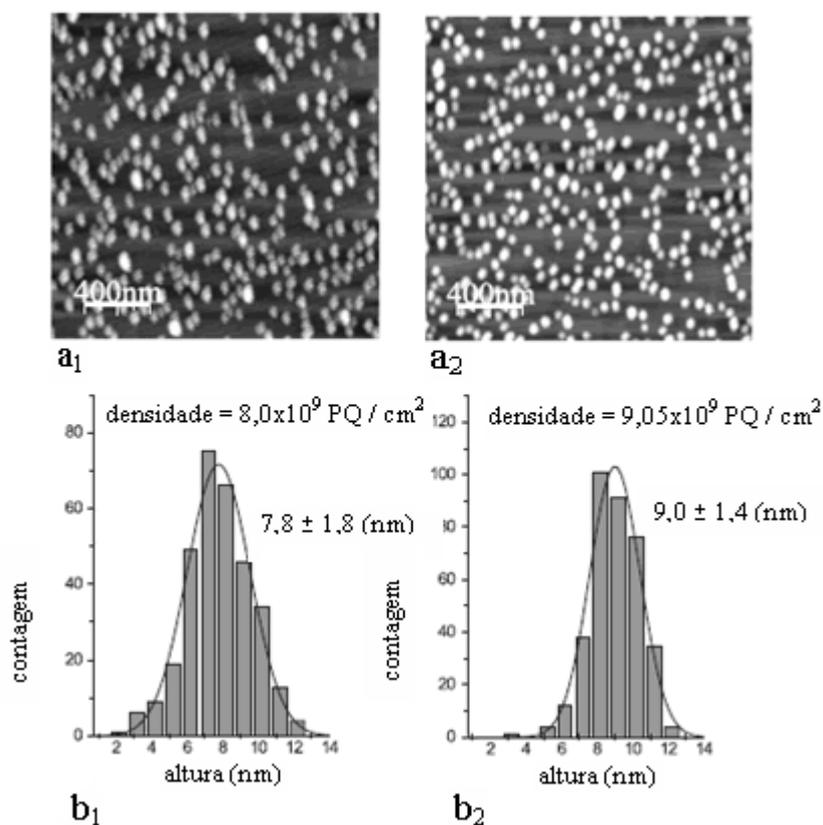


Figura 4.14 - Micrografias AFM e seus histogramas de altura para amostras crescidas sob diferentes temperaturas, a<sub>1</sub>) 500 e a<sub>2</sub>) 520°C. As densidades dos PQ estão indicadas acima dos histogramas de altura representados nas figuras b<sub>1</sub>) 500 e b<sub>2</sub>) 520°C. [50]

Evidência da maior uniformidade na distribuição dos tamanhos de pontos quânticos e da ausência de pontos quânticos menores pode ser observada nos espectros de fotoluminescência da figura 4.15. A largura a meia altura do pico de luminescência para a amostra crescida a 520°C é menor, confirmando uma maior homogeneidade no tamanho dos pontos quânticos. A redução na largura à meia altura comparada com a da amostra crescida a 500°C se dá no lado de energias maiores da curva. Justamente a emissão em energias maiores corresponde a pontos quânticos de menor tamanho. Assim, este resultado confirma a ausência de pontos quânticos menores para amostras crescidas a 520°C.

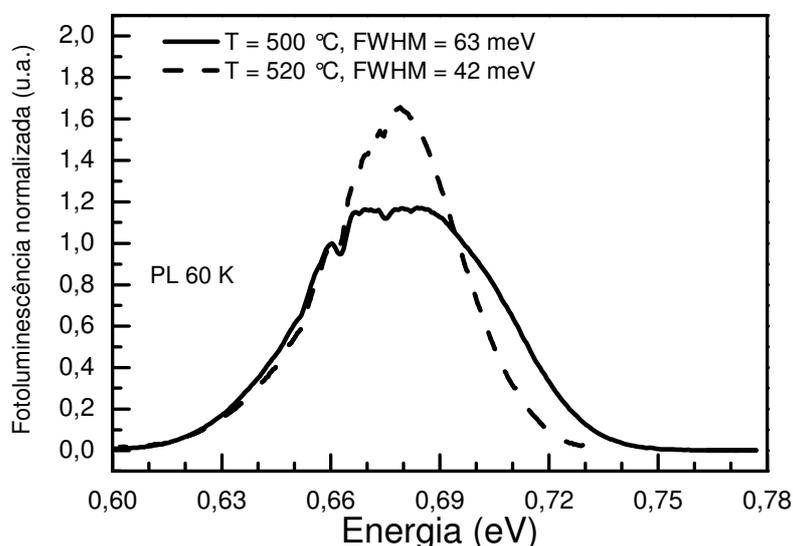


Figura 4.15 – Espectro de fotoluminescência medido a 60 K para amostras crescidas sob diferentes temperaturas, 500 e 520°C. A potência do laser utilizada foi de 10 mW.[50]

Outro parâmetro importante é o tempo de recozimento efetuado após a nucleação dos pontos quânticos. Este tempo é aquele entre o fechamento da fonte de In e antes da troca de As por P para o crescimento da camada que recobre os pontos quânticos. A figura 4.16 mostra os espectros de fotoluminescência de três amostras para as quais três tempos diferentes de recozimento foram utilizados: 12, 24 e 48 segundos. Conforme demonstrada anteriormente a largura a meia altura do pico de luminescência referente aos pontos quânticos aumenta quando há uma distribuição de tamanhos de pontos quânticos menos homogênea. Na figura 4.16

nota-se que para um tempo de recozimento de 48 segundos há um aumento substancial da largura a meia altura do pico de luminescência. Entre 12 e 24 segundos de recozimento não houve praticamente alteração neste parâmetro. A partir desses resultados optou-se por usar um tempo de 12s.

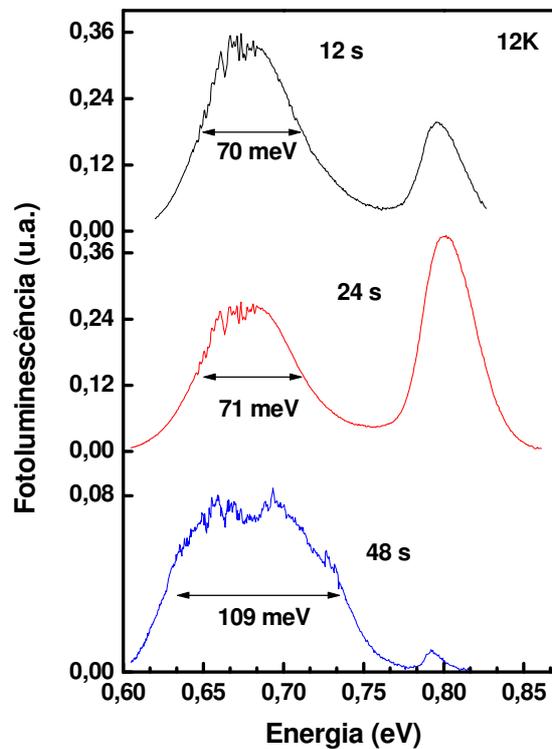


Figura 4.16 – Espectro de fotoluminescência de InAs/InGaAs para as amostras com tempos de recozimento iguais a 12, 24 e 48s .[50]

Quando o fluxo de In aumenta na nucleação dos pontos quânticos tanto a densidade como a altura deles aumenta monotonicamente, como se pode observar nas figuras 4.17 e 4.18. Estes efeitos são esperados dado o aumento de material disponível para a formação de pontos quânticos.

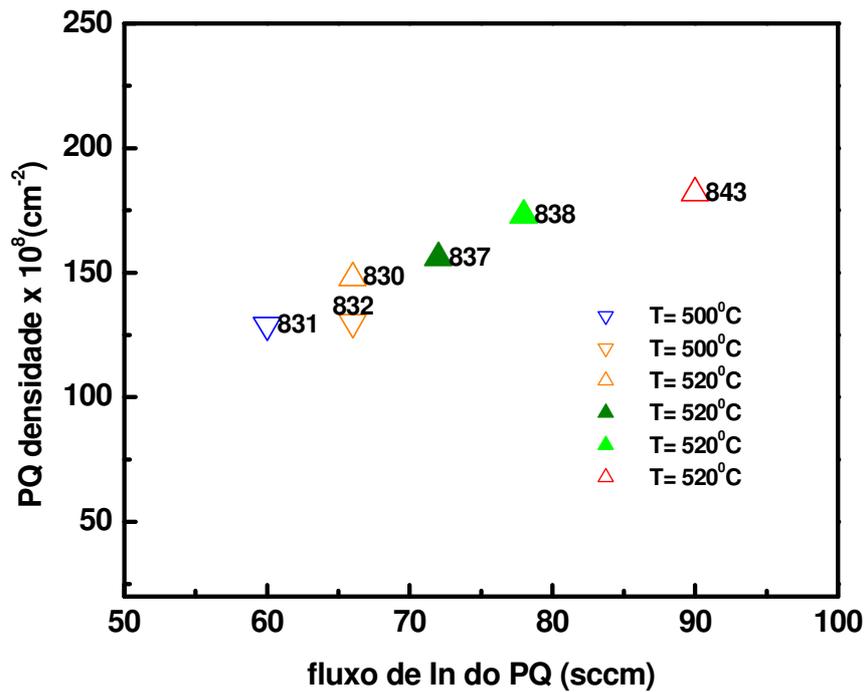


Figura 4.17 – Densidade de pontos quânticos *versus* o fluxo de In utilizado no crescimento seu crescimento.

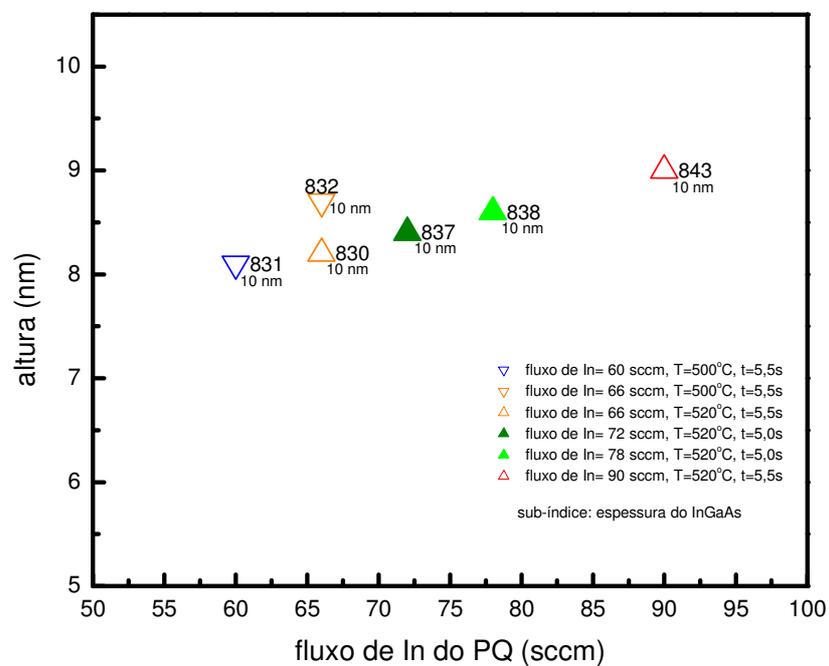


Figura 4.18 – Altura dos pontos quânticos *versus* o fluxo de In utilizado no seu crescimento.

O número de camadas também produz uma mudança significativa no tamanho do PQ, na sua densidade e, conseqüentemente no espectro de luminescência. Medidas de AFM mostram que a altura média do PQ aumenta e a densidade diminui com o número de camadas como pode ser observado nos gráficos inseridos na figura 4.19. O aumento no tamanho dos pontos quânticos implica num menor confinamento, e portanto, numa diminuição na energia de emissão de radiação. Este desvio do espectro de luminescência com o aumento no número de camadas pode ser observado na figura 4.19. Também o acoplamento na vertical dos PQs contribui para o desvio para o vermelho do pico de fotoluminescência. O espectro de fotoluminescência também indica que a homogeneidade dos PQs não é afetada pelo número de camadas, já que a largura a meia altura permanece inalterada.

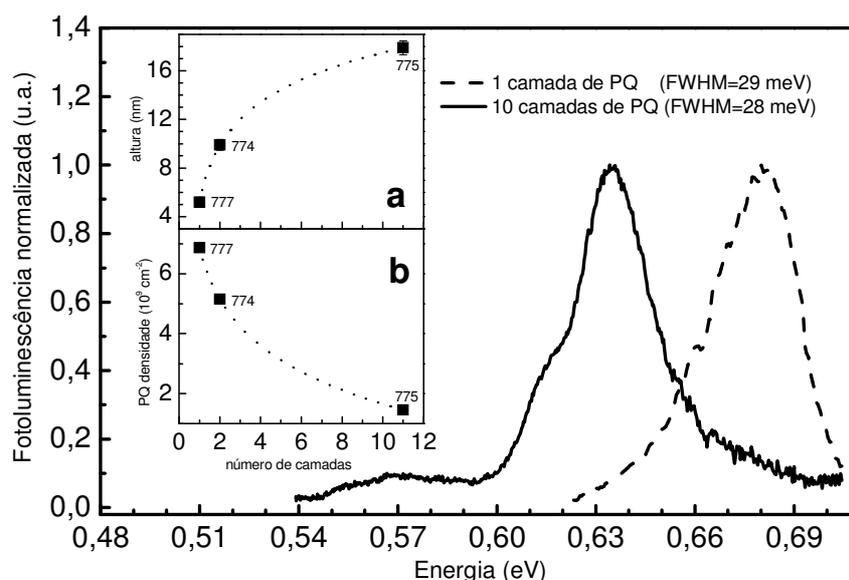


Figura 4.19 – Fotoluminescência normalizada à 12,5K das amostras crescidas com 1 e 10 camadas de PQs.[50]

Quando múltiplas camadas de pontos quânticos são crescidas com uma barreira entre elas suficientemente estreita, é previsto que os PQs sejam nucleados de forma alinhada em função da perturbação imposta pela presença do PQ na camada inferior. A fim de verificar se este efeito ocorre com as amostras investigadas neste trabalho, foram feitas imagens de microscopia eletrônica de

transmissão em uma amostra crescida em condições essencialmente equivalentes às avaliadas aqui. As imagens obtidas estão na figura 4.20.

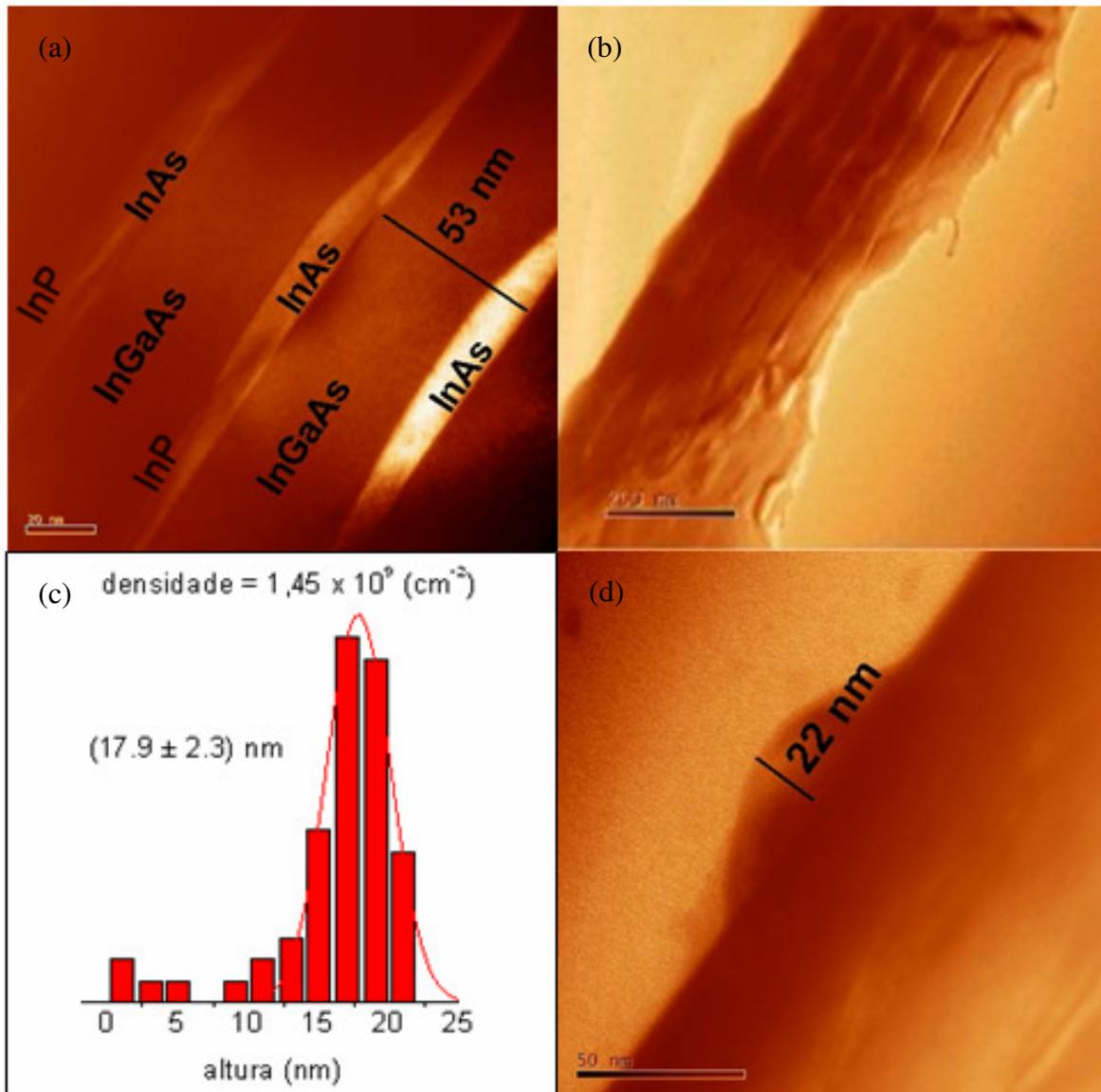


Figura 4.20 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET): (a) imagem da estrutura do PQ mais o poço quântico (escala de 20 nm), (b) imagem das várias camadas do PQ mais o poço quântico (escala de 200 nm), (c) histograma de altura para a última camada de PQ, (d) imagem do PQ (escala de 50 nm). Imagens feitas pelos professores Sandra Marcela Landi e Ivan Guillermo Solórzano Naranjo.

As imagens confirmam que nas amostras investigadas os PQs se encontram alinhados. Além disso, essas imagens tanto permitiram que as espessuras das

camadas fossem determinadas com maior precisão, servindo de calibração para as medidas efetuadas com difratometria de raios-X, confirmando os valores da altura dos pontos quânticos medidos por microscopia de força atômica.

## **2 – Pontos quânticos de InAs sobre InGaAs com diferentes composições da liga.**

Amostras de pontos quânticos de InAs sobre InGaAs foram crescidas variando a composição da liga do material ternário, com o intuito de se conhecer o papel do descasamento do parâmetro de rede na nucleação de pontos quânticos. A imagem de AFM, com o respectivo histograma para a amostra com camada ternária casada com o substrato de InP estão na figura 4.21. O mesmo foi feito para as amostras crescidas com material ternário com diferentes descasamentos. A partir desses dados o gráfico da figura 4.22 foi construído. O descasamento no parâmetro de rede foi obtido através de medidas de difração de raios-X.

Conforme mostrado na figura 4.22, observa-se que à medida que a composição da liga se afasta da condição de casamento de parâmetro de rede (descasamento = 0), a altura dos pontos quânticos diminui até atingir um descasamento da ordem de 2500 ppm nos dois sentidos (tensão e compressão). A partir deste descasamento a altura dos pontos quânticos essencialmente volta ao valor obtido para o ternário casado com InP. Note que de acordo com a figura 4.22 este fenômeno ocorre para condições de crescimento diferentes.

Este fenômeno pode ser explicado da seguinte maneira. Variando o fluxo de Ga a partir do valor correspondente à composição da liga para a qual não existe descasamento do parâmetro de rede, a camada ternária passa a estar tensionada. Esta tensão faz com que a altura dos pontos quânticos fique reduzida, conforme observado na figura 4.22. A partir de um certo descasamento no parâmetro de rede, a tensão na camada ternária é tal que ela relaxa e readquire seu parâmetro de rede original. Assim, neste ponto a camada de InGaAs não está mais tensionada, e, os pontos quânticos passam a ter a altura correspondente aos crescidos sobre uma camada de InGaAs casada com o InP. Este resultado indica que a altura dos pontos quânticos depende mais da tensão do material sobre o qual ele é nucleado do que da razão entre os elementos químicos In e Ga. A fim de confirmar esta hipótese é preciso verificar se de fato o descasamento em torno de 2500 ppm,

observado experimentalmente, corresponde ao valor crítico para relaxamento da camada de InGaAs. O descasamento crítico teórico calculado a partir da fórmula de Matthews é de 2700 ppm para uma camada de InGaAs com espessura de 500 nm, indicada por flechas na figura 4.22.

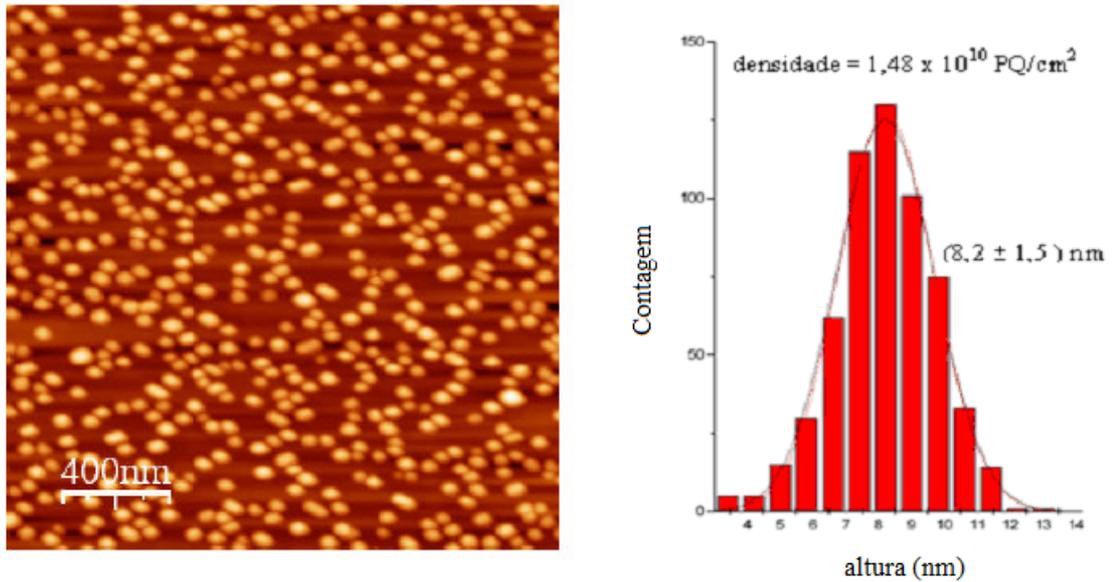


Figura 4.21 – Micrografia de AFM de PQs de InAs sobre InGaAs casado com InP com seu respectivo histograma de altura.

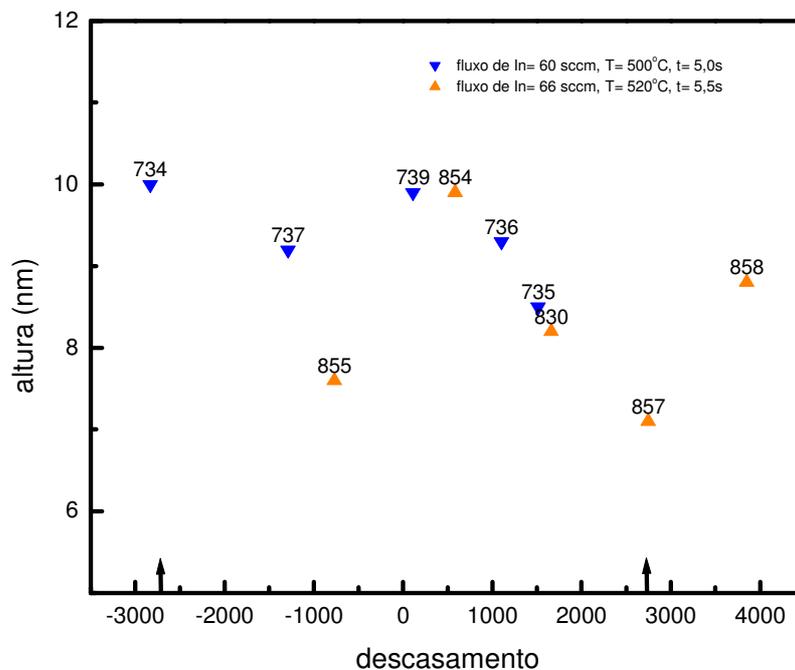


Figura 4.22 – Altura média do PQ *versus* o descasamento da liga de InGaAs para duas diferentes temperaturas. [51]

Em relação à densidade de pontos quânticos em função do descasamento de parâmetro de rede, conforme a figura 4.23, observa-se um aumento à medida que passamos de uma situação de compressão (parâmetro de rede maior que de InP) para tensão (parâmetro de rede menor que de InP). Para amostras crescidas em 520°C, a densidade vai de  $1.3 \times 10^{10}$  PQ/cm<sup>-2</sup> a  $1.75 \times 10^{10}$  PQ/cm<sup>-2</sup>. Note que o PQ é de InAs que possui um parâmetro de rede maior que o ternário. A diferença de parâmetro de rede entre o ternário, sobre o qual o PQ é nucleado, e o material do PQ aumenta à medida que passamos de um material comprimido, rico em Ga em relação ao material casado, para um material tensionado, rico em In. É portanto natural que haja mais sítios de nucleação para a camada tensionada, explicando o aumento na densidade de pontos quânticos.

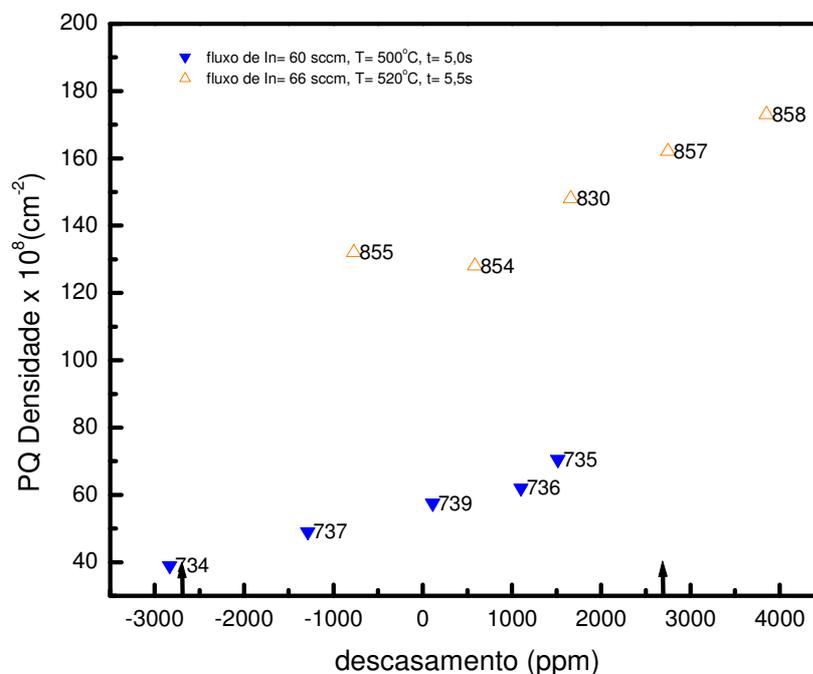


Figura 4.23 – Densidade dos PQs *versus* o descasamento da liga de InGaAs para duas diferentes temperaturas. [51]

Amostras equivalentes às apresentadas nas figuras 4.22 e 4.23 crescidas a 520°C, foram fabricadas porém com os pontos quânticos enterrados. Os PQs foram cobertos com uma camada de InP para permitir medidas de fotoluminescência. Os espectros obtidos estão na figura 4.24 onde a concentração de In na liga vai de 48.4% até 58%, passando pela condição de casamento de parâmetro de rede com InP em 53%. Observa-se que os picos são bastante largos

e assimétricos, indicando que a banda contém mais de uma emissão. Além disso, uma clara variação na energia de pico é detectada. Fazendo um ajuste desses espectros com duas gaussianas, é possível observar como varia o pico de luminescência em função da composição da liga ternária.

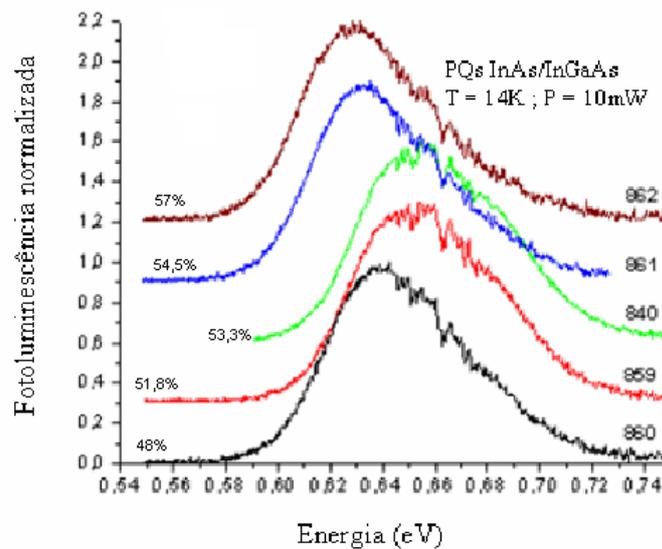


Figura 4.24 – Fotoluminescência versus energia para concentrações de In na liga de InGaAs que variam de 48.4% até 58%. [51]

Um exemplo do ajuste realizado está na figura 4.25. A partir dos ajustes feitos obtêm-se os resultados mostrados na figura 4.26. Nota-se que o pico de luminescência se desloca para mais baixas energias à medida que a composição da liga se afasta da condição de casamento de parâmetro de rede.

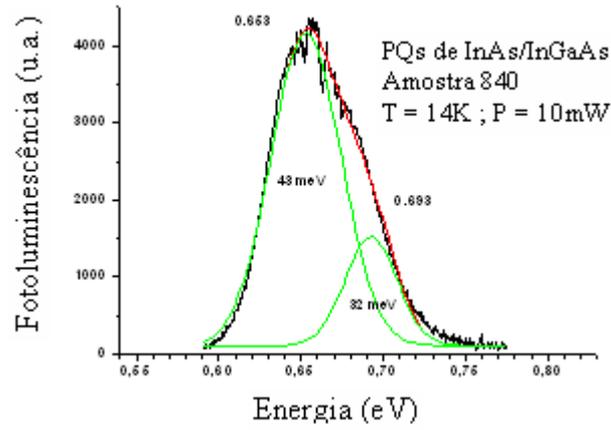


Figura 4.25 – Fotoluminescência versus energia para amostra 840. [51]

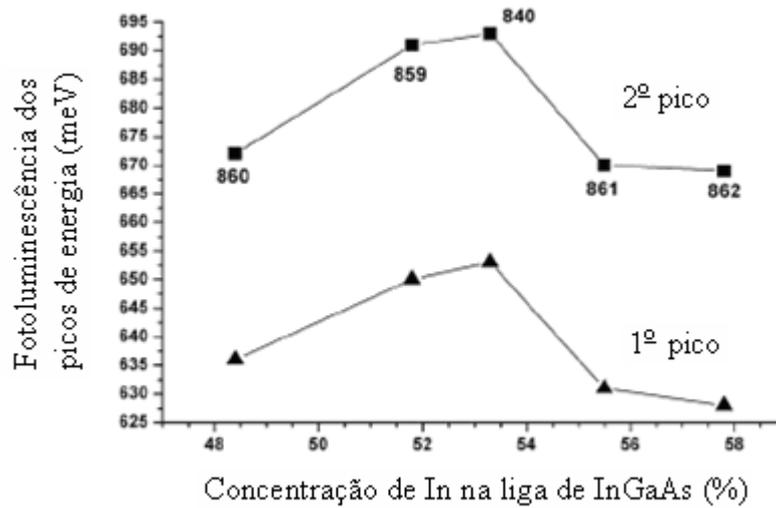


Figura 4.26 – Picos de energia versus a concentração de In na barreira de InGaAs. [51]

A fim de entender o comportamento apresentado no gráfico da figura 4.26, cálculos unidimensionais da energia de transição para estas estruturas foram feitos. No modelo teórico a tensão oriunda das diferenças de parâmetros de rede entre o InAs, o InGaAs e o InP foram levadas em consideração. De acordo com os resultados, espera-se uma diminuição monotônica da energia de transição à medida que a concentração de In na liga aumenta. Esta redução na energia é consequência da diminuição do *gap* do InGaAs com o aumento na concentração de In na liga. Então, em princípio deveríamos esperar uma diminuição constante na energia dos picos de fotoluminescência com o aumento de In na liga.

O efeito da composição da barreira na energia de PL está ilustrado qualitativamente pela linha vermelha na figura 4.27. Outro efeito que deve influenciar a energia de transição óptica é o tamanho do ponto quântico, dado que quanto menor ele for, maior será o confinamento, e portanto, maior será a energia de transição. Neste caso, como o tamanho dos PQs diminui à medida que nos afastamos da condição de casamento de parâmetro de rede, ou seja, da concentração de In na liga de 53%, esperaríamos que o pico de luminescência desloca-se para o azul. O efeito do tamanho do PQ na energia de PL está ilustrado qualitativamente pela linha amarela na figura 4.27. Porém isto é exatamente o oposto do observado. Observa-se que os picos de PL se deslocam para o vermelho à medida que nos afastamos da concentração de In de 53%.

A energia de transição também pode ser influenciada pelo efeito denominado de *intermixing*. Este fenômeno nada mais é que a troca de sítios de elementos diferentes da mesma sub-rede entre camadas adjacentes. Em função do movimento de átomos de Ga e In entre o PQ e a camada ternária, espera-se que quanto maior for a concentração de Ga na liga ternária, maior será sua concentração no PQ, nominalmente constituída apenas de InAs [52]. Assim, quanto menor for a concentração de In na liga, mais Ga irá para o PQ e portanto, maior será o seu *gap* de energia. Isto significa que quanto maior a concentração de In na liga, menor deve ser a energia do pico de luminescência. O efeito de *intermixing* na energia de PL está ilustrado qualitativamente pela linha verde na figura 4.27. O conjunto desses efeitos explica, pelo menos qualitativamente, a diminuição na energia dos picos de PL para concentrações de In na liga acima de 53%, ou seja, para ligas ricas em In em relação à condição de casamento de parâmetro de rede. A diminuição na energia de transição óptica para amostras

com concentração de In inferior a 53% não pode ser explicada por nenhum desses fenômenos.

Um quarto efeito, porém, pode influenciar a energia de emissão de luminescência. Deve-se avaliar a variação dos campos de tensão em torno dos PQs de InAs quando a estequiometria da liga varia a partir da camada ternária casada. Para concentrações de In inferiores a 53%, a camada ternária está comprimida em relação ao InP, material sobre o qual ela é depositada. O PQ de InAs, crescido sobre o InGaAs comprimido está tensionado. Então se tem alternadamente uma compressão e uma tensão, aliviando de uma forma geral a tensão. No caso, de concentrações de In superiores a 53%, a camada de InGaAs também está tensionada. Neste caso há um acúmulo de tensão no mesmo sentido. Concluímos então que aumentando a concentração de In na liga há um acúmulo de tensão. Um aumento na tensão leva a um deslocamento nas energias de transição para o azul, ou seja, para energias maiores. Este comportamento é exatamente o oposto ao observado para os efeitos de composição da liga e de *intermixing*, e está ilustrado qualitativamente pela linha azul na figura 4.27. Incluindo este fenômeno torna-se então possível explicar qualitativamente os resultados apresentados na figura 4. 26.

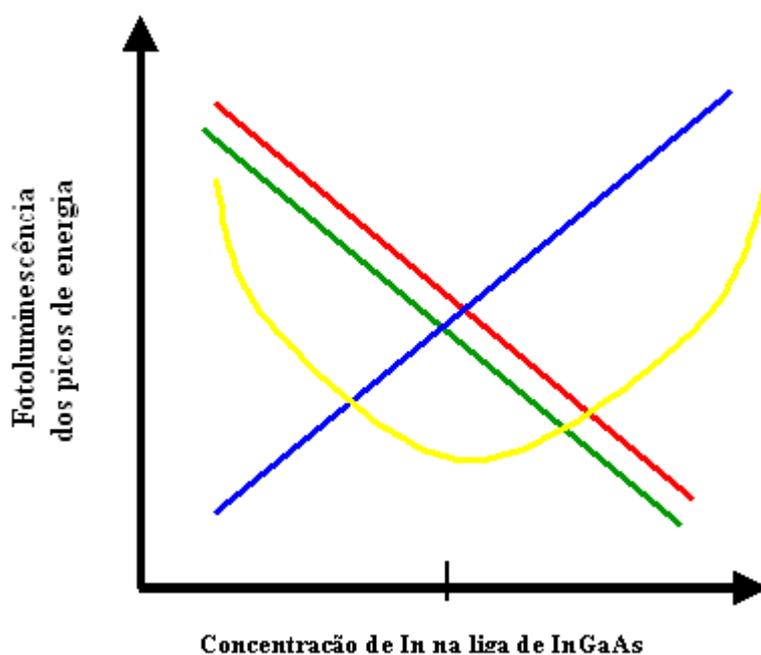


Figura 4.27 – Modelagem da fotoluminescência *versus* a composição de In da barreira de InGaAs.

### 3 – Fotodetectores de infravermelho

Estruturas de QDIPs foram fabricadas utilizando as condições de crescimento otimizadas, descritas nos itens anteriores. Um esquema das estruturas está mostrado na figura 4.28. As estruturas são do tipo *nin*. Amostras dopadas e não dopadas foram crescidas. Na fabricação de estruturas para operarem baseadas em transições intrabanda, o ideal é que o nível eletrônico inicial da transição esteja totalmente ocupado e que o nível final da transição esteja desocupado. Caso, o nível fundamental seja o estado inicial da transição, então é necessário dopar o material de forma que cada ponto quântico contenha dois elétrons. É claro que este nível de dopagem será uma média. No caso da densidade de dopantes ser o dobro da densidade de pontos quânticos, haverá uma certa parcela dos PQs com dopagem superior e também inferior ao valor nominal.

O dopante *n* escolhido foi o Si cuja fonte utilizada foi o silano, SiH<sub>4</sub>. A dopagem das camadas *n* de contacto não apresentam nenhuma dificuldade tanto no caso de InP como de InGaAs. Porém, a calibração da dopagem dos pontos quânticos é feita de forma indireta. Calibra-se a dopagem no material bulk e assume-se que a mesma quantidade de dopantes será incorporada para o material na forma de pontos quânticos. Como os pontos quânticos são de InAs, existe uma dificuldade adicional porque não se pode crescer InAs bulk sem a introdução de muitos defeitos em função da grande diferença de parâmetro de rede com o substrato. Assim, estima-se o nível de dopagem para o InAs a partir dos resultados obtidos para material ternário (InGaAs). No material bulk a dopagem é calibrada usando medidas de efeito Hall.

Os resultados de fotocorrente serão apresentados para duas amostras de QDIPs: uma não dopada, 780 e outra dopada, 782. A estrutura da banda de condução para as amostras está ilustrada na figura 4.29. Existe uma diferença adicional entre as duas amostras. A 780 possui 10 períodos enquanto que 782 possui 20.

x 10	InP : n $4 \times 10^{18}$ Si / cm <sup>3</sup>	300nm	x 20	InP : n $4 \times 10^{18}$ Si / cm <sup>3</sup>	300nm
	InP	100nm		InP	100nm
	InP	18nm		InP	18nm
	PQ de InAs	2,5 ML		PQ de InAs dopado	2,5 ML
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> As x = 0,468	8,5nm		In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> As x = 0,468	8,5nm
	InP	100nm		InP	100nm
	InP : n $4 \times 10^{18}$ Si / cm <sup>3</sup>	500nm		InP : n $4 \times 10^{18}$ Si / cm <sup>3</sup>	500nm
	InP substrato			InP substrato	

Figura 4.28 – Estrutura crescida para QDIP para as amostras: 780 (10 períodos) e 782 (20 períodos, com PQ dopado).

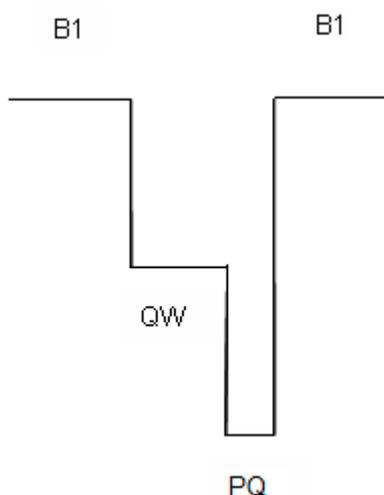


Figura 4.29 – Desenho esquemático da estrutura da banda de condução para as amostras.

Primeiramente foram realizadas medidas de fotoluminescência em 77K nas amostras investigadas em função da potência de excitação. Estes espectros estão mostrados nas figuras 4.30 e 4.31 para as amostras não dopada e dopada, respectivamente. A figura 4.30 apresenta uma banda de luminescência referente à emissão de radiação pelos pontos quânticos em torno de 0.65 eV. A banda na realidade, como mostram os espectros, possui uma emissão predominante e um ombro em altas energias que cresce em intensidade com o aumento na potência de

excitação. Este ombro é atribuído à emissão de fótons a partir do estado excitado que passa a emitir com o excesso de elétron de condução criados pela potência de excitação elevada.

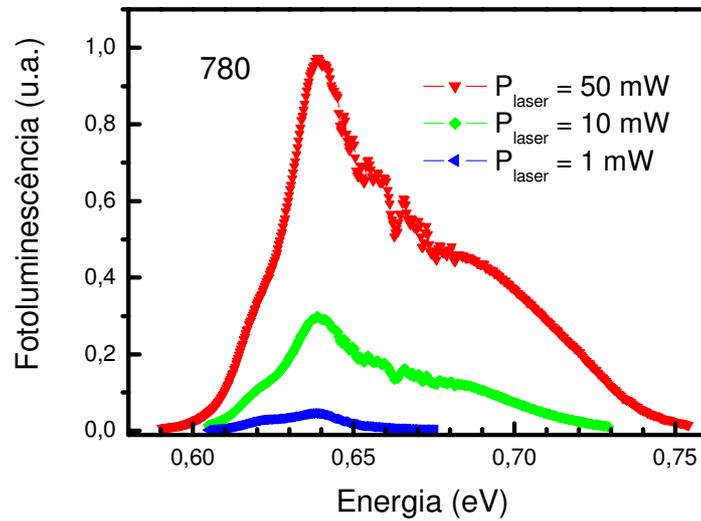


Figura 4.30 – Espectros de fotoluminescência a: amostra 780 com 10 camadas de PQ (não dopado) em função da potência de excitação.

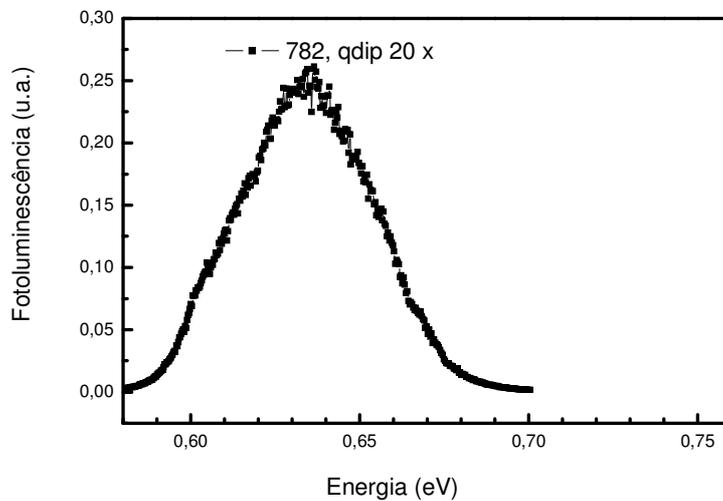


Figura 4.31 – Fotoluminescência versus energia para: amostra 782 com 20 camadas de PQ (dopado).

A fim de avaliar o desempenho dos fotodetectores, medidas de fotocorrente foram feitas por meio de um espectrômetro de Transformada de Fourier (FTIR) com incidência normal e a  $45^\circ$  com temperatura variando entre 6 e 120K. O espectro de fotocorrente foi corrigido pela resposta espectral do sistema. Dois tipos de medidas foram feitos. Uma avaliação em relação à dependência com a polarização e uma em função da temperatura de operação. Na dependência com a polarização tenta-se observar se de fato as amostras se comportam como QDIPs, ou seja, se absorvem luz com incidência normal. Para poços quânticos somente a luz incidente com campo elétrico perpendicular às camadas pode ser absorvida numa transição intrabanda, enquanto que para PQs esta regra de seleção é abolida. A variação com a temperatura é importante para saber qual pode ser a temperatura atingida pelo dispositivo. Em princípio, os QDIPs devem funcionar a temperaturas mais elevadas que os QWIPs.

A figura 4.32 mostra espectros de fotocorrente a 6 K para a amostra 780 para diferentes configurações experimentais: incidência normal, incidência a  $45^\circ$  com polarização TE, incidência a  $45^\circ$  com polarização TM e luz não polarizada. As polarizações TE (polarização s) e TM (polarização p) referem-se à luz incidente com campo elétrico paralelo e perpendicular às camadas, respectivamente. A figura 4.33 mostra um esquema da geometria de medida. O mesmo pico em  $5.3 \mu\text{m}$  é observado para todas as configurações, como esperado. Para a polarização TE o sinal de fotocorrente está estimado em vinte vezes mais intenso do que para a polarização TM. Os coeficientes de transmissão de Fresnel para ambas as polarizações e o fato que 50% da luz incidente com polarização TM terá polarização TE foram levados em consideração a fim de se estimar a razão dos sinais de fotocorrente para ambas as polarizações.

Para a amostra dopada outros picos de absorção são observados. As transições mais evidentes nos espectros da figura 4.34 estão em 3.8, 5.3 e  $6.3 \mu\text{m}$ . Um comportamento equivalente quanto à polarização, apesar dos sinais mais ruidosos, foi observado para a amostra dopada 782 como mostrados na figura 4.34. A amostra 782 contém o dobro de camadas do que da amostra 780. Embora fosse esperado um sinal mais intenso, a tensão propagada foi mais intensa em uma estrutura de maior espessura acarretando mais ruído detectado na fotocorrente.

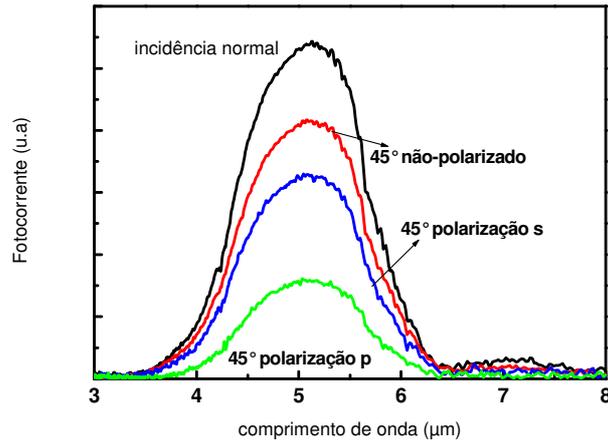


Figura 4.32 – Espectro de fotocorrente para a amostra 780 à 6K versus o comprimento de onda para diferentes estados de polarização.

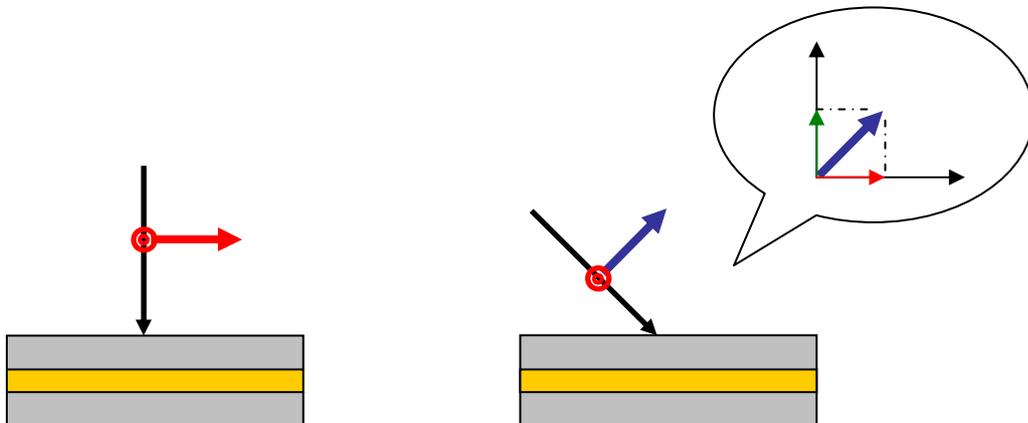


Figura 4.33 – Diagrama esquemático da geometria de medida.

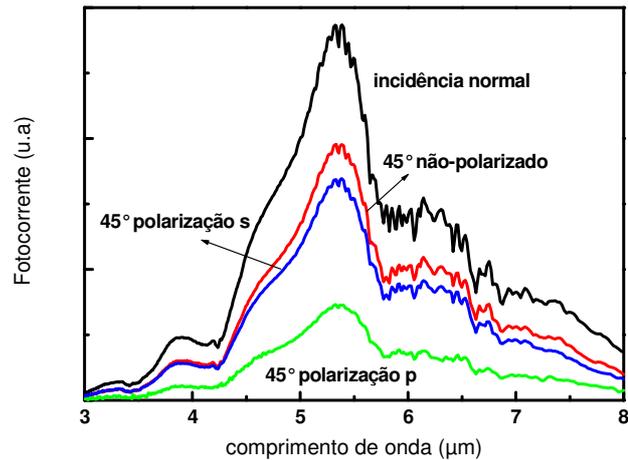


Figura 4.34 – Espectro de fotocorrente para a amostra 782 (dopada) à 6 K versus o comprimento de onda para diferentes estados de polarização.

As figuras 4.35 e 4.36 mostram uma dependência com a temperatura para a luz incidente perpendicular à superfície para as amostras 780 e 782. O sinal pode ser detectado para temperaturas de até 100 e 60 K, respectivamente. Não foi observada uma mudança no comportamento da polarização quando se variou a temperatura.

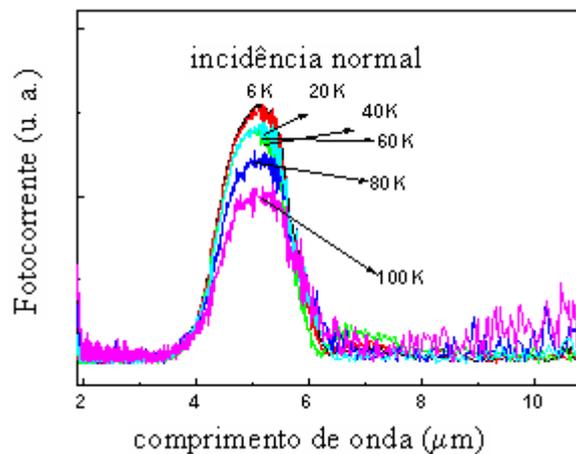


Figura 4.35 – Espectro de fotocorrente para a amostra 780 versus o comprimento de onda para diferentes temperaturas.

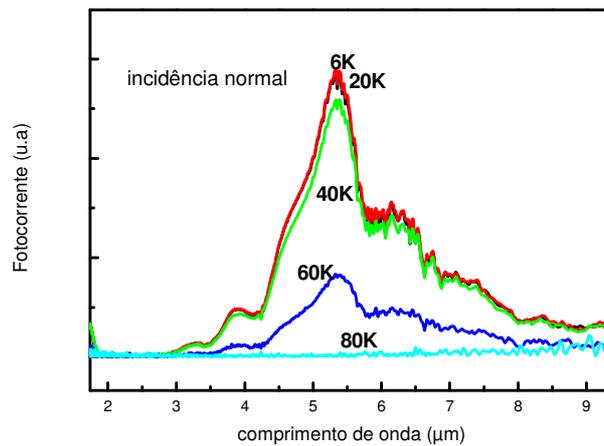


Figura 4.36 – Espectro de fotocorrente para a amostra 782 (dopada) versus o comprimento de onda para diferentes temperaturas.

Assim, conforme desejado e esperado, as amostras fabricadas forneceram QDIPs com detecção na faixa do infravermelho médio. Para melhorar o desempenho dos dispositivos é necessário aumentar ainda mais a densidade de pontos quânticos e a fim de variar o comprimento de onda de detecção, estruturas mais versáteis devem ser propostas e investigadas. Este é o assunto da próxima seção. Porém, antes de encerrar este capítulo, apesar de não ter sido meu trabalho, por completeza serão mencionados alguns resultados teóricos obtidos pelo grupo e uma tentativa de identificar essas transições.

Um modelo unidimensional de massa efetiva para elétrons foi utilizado para calcular os níveis eletrônicos da estrutura, efeitos de tensão foram incluídos, os *band-offsets* foram utilizados a partir de dados da literatura e os parâmetros para o material ternário foram interpolados a partir de dados disponíveis para os materiais binários. Os resultados dos cálculos estão mostrados na figura 4.37. A partir das funções de onda a força de oscilador para as diferentes transições também foi calculada e ela é bem mais elevada para transições entre estados ligados do que entre estados ligados e o contínuo. Portanto, as transições observadas devem ser entre estados ligados.

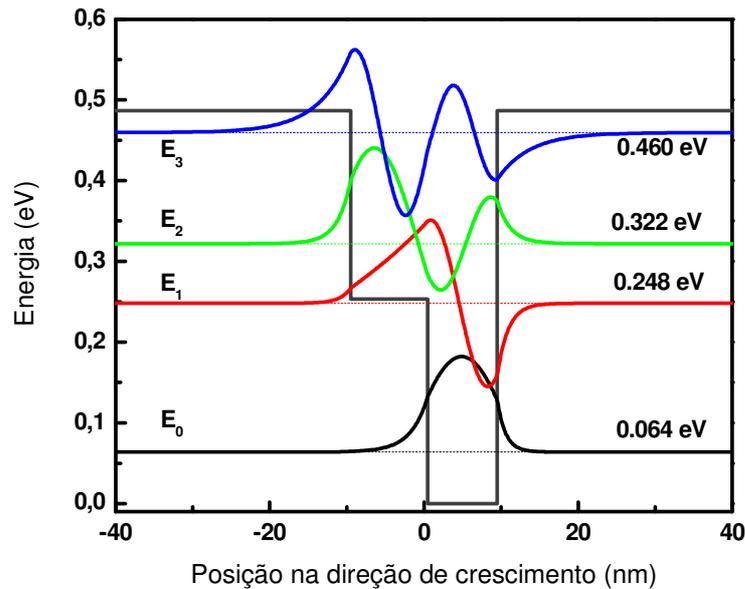


Figura 4.37 – Simulação dos níveis eletrônicos da estrutura.

No caso da amostra não-dopada alguns pontos quânticos devem ter o nível fundamental ocupado em função da dopagem residual. Assim, as transições devem ter início no nível,  $E_0$ , na figura 4.37. Já para a amostra dopada, níveis excitados, tais como  $E_1$  e  $E_2$  podem ser os estados iniciais das transições. Dentre as transições que têm início em  $E_0$ , a para  $E_1$  é a que possui a maior força de oscilador. Desta forma a transição em  $5.3 \mu\text{m}$  para ambas as amostras é atribuída a esta transição. No caso dos picos em  $4.0$  e  $6.3 \mu\text{m}$  para a amostra dopada, eles são atribuídos às transições  $E_1 - E_3$  e  $E_2 - E_3$  em função do valor das energias e da força de oscilador calculada. A partir de  $E_1$  e  $E_3$  os elétrons podem tunelar em direção aos contactos para contribuir para a fotocorrente como já foi observado para essas amostras.

Comparando as energias observadas experimentalmente e as calculadas temos:

Cálculos teóricos	Energias medidas	Comprimento de onda
$E_1 - E_0 = 184 \text{ meV}$	$E_1 - E_0 = 234 \text{ meV}$	$5.3 \mu\text{m}$
$E_3 - E_1 = 212 \text{ meV}$	$E_3 - E_1 = 326 \text{ meV}$	$3.8 \mu\text{m}$
$E_3 - E_2 = 138 \text{ meV}$	$E_3 - E_2 = 197 \text{ meV}$	$6.3 \mu\text{m}$

Observa-se que as energias calculadas estão subestimadas e as razões possíveis para esta discrepância são os valores dos *band-offsets*, o tamanho do ponto quântico e sobretudo a simplicidade do modelo. As energias medidas são muito superiores à energia térmica de 25 meV indicando que o fotodetector pode funcionar a temperatura ambiente.

De acordo com o estudo realizado de pontos quânticos de InAs nucleados sobre InGaAs para a obtenção de uma densidade de PQs da ordem de  $10^{10}$  PQs/cm<sup>2</sup> e de altura  $8,2 \pm 1,5$  nm deve-se utilizar um tempo de deposição de 5.2 s, uma temperatura do substrato de 520 °C, um recozimento de cerca de 12s. O InGaAs casado com o InP ocorre para um percentual de In de 53,3% de In. Otimizadas as condições de crescimento foram processados dois dispositivos: a 780 com dez períodos e a 782 com 20 períodos e o PQ dopado. Dessas amostras a 780 mostrou uma fotodetecção em 5.3 µm sob temperatura de 100K e a 782 uma fotodetecção em 3.8, 5.3 e 6.3 µm sob temperatura de 60 K. Mostrando que essas amostras têm excelentes estruturas para fotodetectores no infravermelho médio.

### 4.3 Análise da estrutura InAs/InGaAlAs

Esta seção tem dois objetivos, são eles: analisar os parâmetros de crescimento de PQs de InAs sobre InGaAlAs a fim de otimizar tais estruturas para a fabricação de fotodetectores para o infravermelho médio e avaliar o desempenho dos dispositivos confeccionados com estruturas otimizadas.

Primeiramente, camadas de pontos quânticos de InAs crescidos sobre InGaAlAs casado com InP serão avaliadas em relação às condições de crescimento. Em seguida, o papel da composição da liga do material quaternário na nucleação dos pontos quânticos será avaliado.

Finalmente, o desempenho de dispositivos fabricados com as melhores estruturas será apresentado.

#### 1 – Pontos quânticos de InAs sobre InGaAlAs fino e *bulk* casado com InP .

Inicialmente foi crescida uma camada de 150 nm de InP à 630°C sobre o substrato de InP, seguida de uma camada de 500 nm de uma liga quaternária de InGaAlAs casada com o InP sobre a qual foi depositada uma camada de PQs de InAs. Por meio da difração de raios-X, as taxas de crescimento foram calibradas em 8,6 Å/s de forma se medir um filme de InGaAlAs com espessura de 500 nm. A partir desse material *bulk* de InGaAlAs, o mesmo é caracterizado por meio da fotoluminescência e da difração de raios-X determinando-se a composição de In, Ga e Al. Nesses crescimentos procurou-se sempre fixar o valor do fluxo de In, apenas variando o Ga e o Al. Os crescimentos foram casados com o InP e o percentual de Al foi determinado em 18,5% a fim de se maximizar a densidade de PQs.

Para se determinar a possibilidade de diminuir a espessura do InGaAlAs, de 5000 Å para 15 Å e manter a densidade de PQs, foram crescidas duas amostras e verificou-se pela micrografia de AFM que a densidade permaneceu praticamente a mesma. Na amostra mais espessa, de 5000 Å, o resultado foi de  $1,0 \times 10^{10}$  PQs/cm<sup>2</sup>, e na amostra de menor espessura, a densidade foi de  $1,2 \times 10^{10}$  PQs/cm<sup>2</sup>. Na figura 4.38 pode-se observar o aspecto das micrografias.

Nos gráficos das figuras 4.39 e 4.40 tem-se um estudo realizado por Magnus et al [53] com valor otimizado 23 % de Al na liga de InGaAlAs. A altura do PQ foi abaixo de 5 nm para temperatura do substrato em 500°C e tempo de crescimento dos PQs em 5,0 s. Apesar da alta densidade alcançada na amostra 590 por Magnus et al, a mesma apresentou uma péssima qualidade morfológica com grande dispersão de tamanho. Iniciou-se então um estudo novo de calibração a partir dos dados de Magnus et al em torno dos 23% de Al.

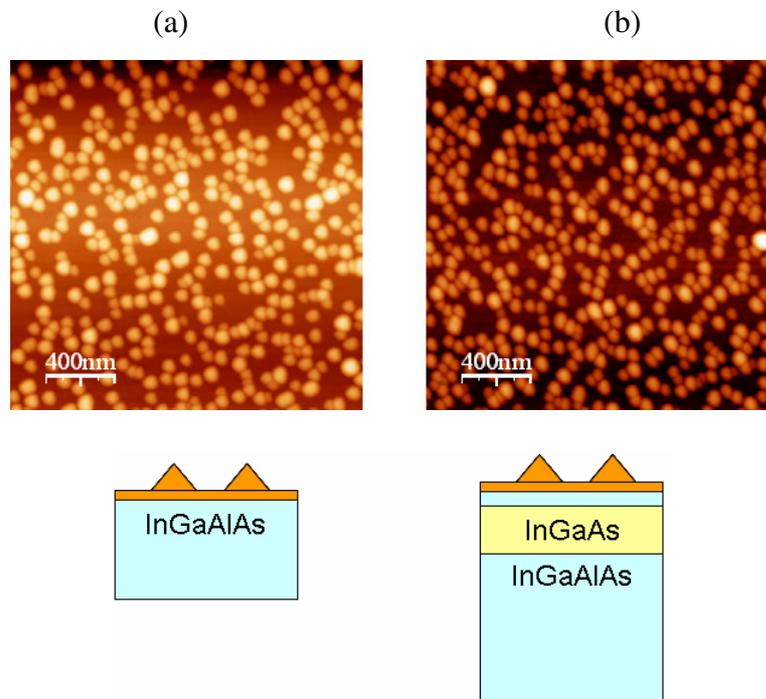


Figura 4.38 – Micrografia de AFM nos seguintes casos: (a) PQs de InAs sobre o 5000 Å de InGaAlAs ; (b) sobre 15 Å de InGaAlAs.

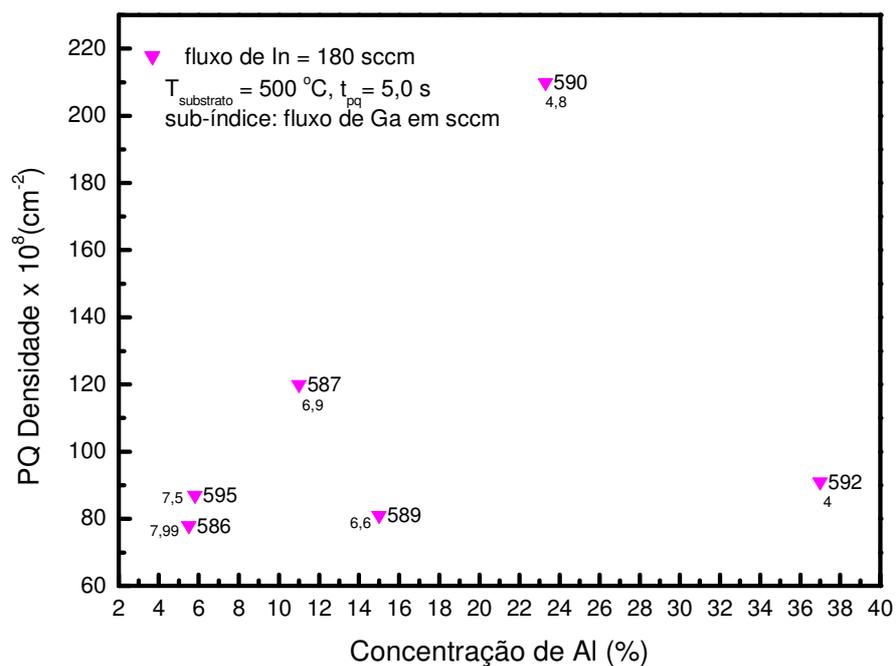


Figura 4.39 – Gráfico da densidade planar de PQs *versus* o percentual de Al na liga InGaAlAs.[53]

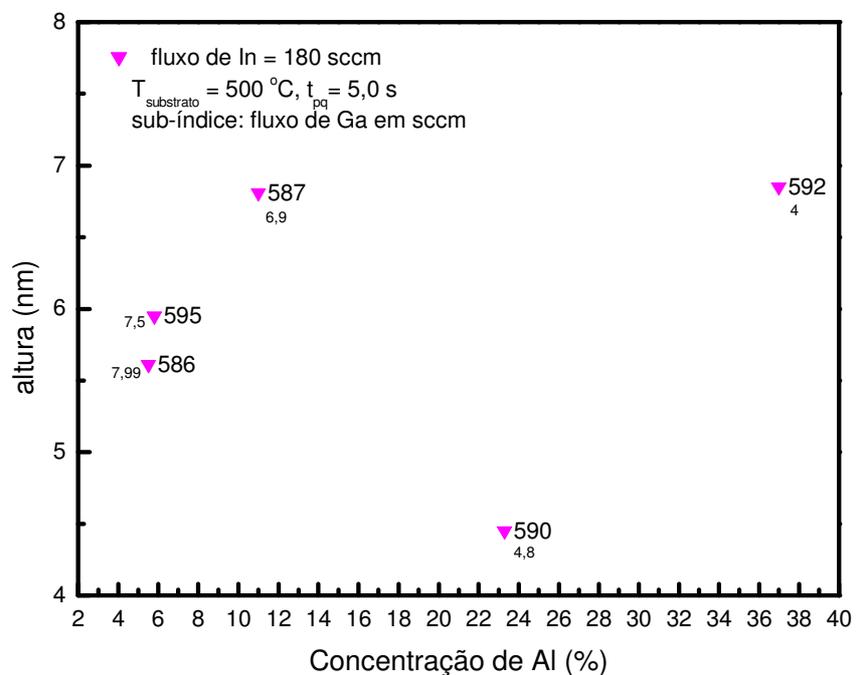


Figura 4.40 – Gráfico da altura dos PQs *versus* o percentual de Al na liga InGaAlAs.[53]

A figura 4.41 mostra o gráfico de densidade *versus* o tempo, a densidade *record* foi alcançada para a amostra 963 com uma densidade planar de  $2,35 \times 10^{10}$  PQs/cm<sup>2</sup>. Porém após uma substituição do cilindro da fonte de Índio, não se conseguiu reproduzir essa elevada densidade conforme se observa para amostra 976. Analisando a figura 4.42 tem-se que a menor altura não correspondeu à maior densidade, a menor altura ocorreu para um tempo de 5,5 s. Observa-se que à medida que o tempo aumenta, aumenta a quantidade de material, porém não aumentou a densidade e sim a altura.

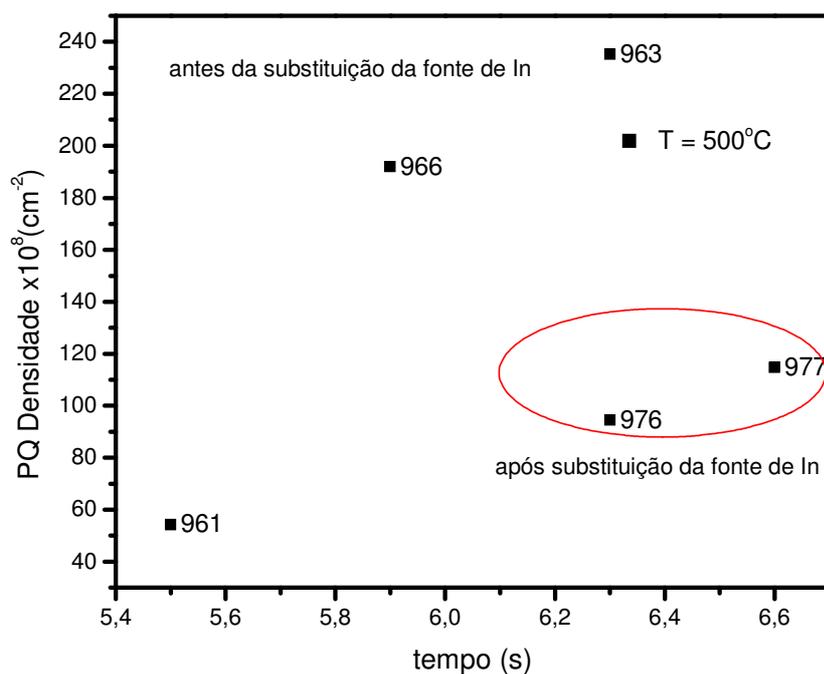


Figura 4.41 – Gráfico da densidade planar de PQs *versus* o tempo de crescimento dos PQs de InAs sobre o InGaAlAs.

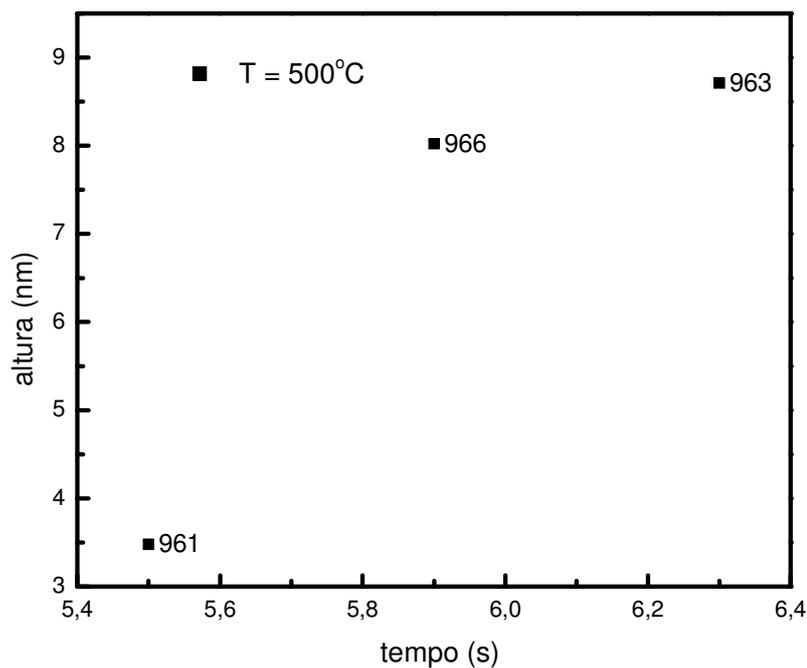


Figura 4.42 – Gráfico da altura dos PQs de InAs *versus* o tempo de crescimento dos PQs de InAs sobre a liga InGaAlAs.

Nos gráficos das figuras 4.43 e 4.44 a densidade planar foi otimizada para 18 % de Al na liga de InGaAlAs e altura para um valor inferior a 10 nm, temperatura do substrato em 520°C e tempo de crescimento dos pontos quânticos em 5,5 s. O aumento na densidade com relação à concentração deve-se provavelmente a reatividade do mesmo observado em experiências do laboratório no crescimento seletivo.

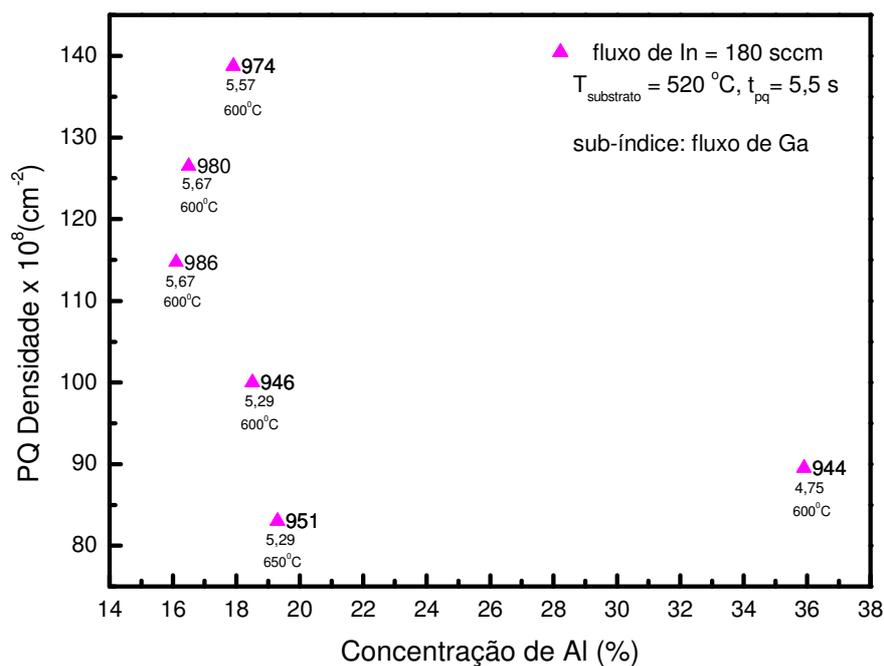


Figura 4.43 – Gráfico da densidade planar de PQs *versus* o percentual de Al na liga InGaAlAs.

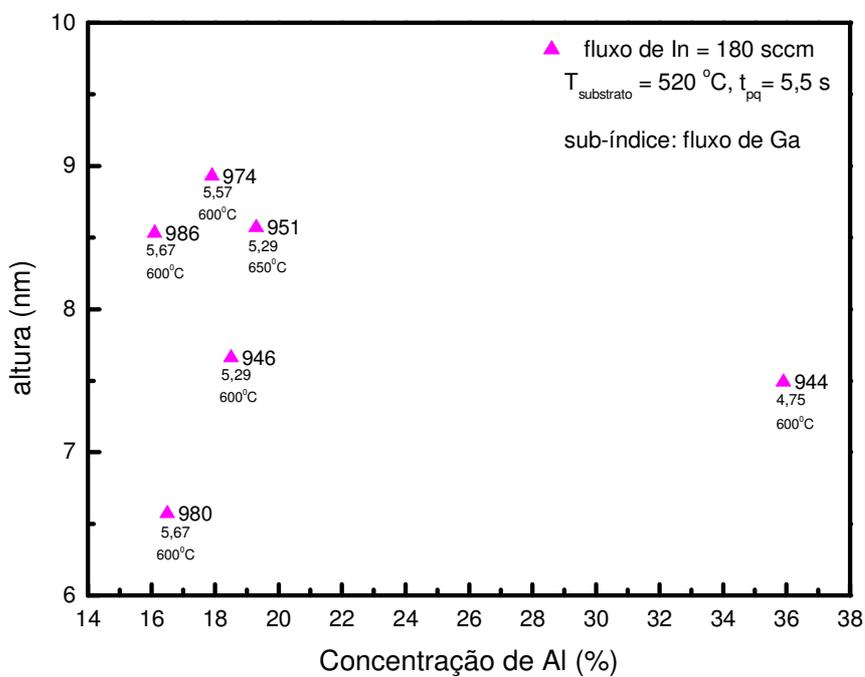


Figura 4.44 – Gráfico da altura do PQs *versus* o percentual de Al na liga InGaAlAs.

No gráfico da figura 4.45 podem-se observar três pontos: o primeiro ponto com descasamento negativo, ou seja o InGaAlAs tem o parâmetro de rede levemente superior ao InP (conseqüentemente mais próximo do parâmetro de rede do InAs que é fixo) portanto a compressão do parâmetro de rede do InAs é menor não sendo favorável à formação dos PQs (densidade menor à medida que o descasamento é mais negativo, caso da amostra 980); no segundo ponto o InGaAlAs têm o parâmetro de rede levemente inferior ao InP (conseqüentemente mais distante do parâmetro de rede do InAs que é fixo) portanto a compressão do parâmetro de rede do InAs é maior sendo favorável à formação dos PQs (densidade maior à medida que o descasamento é mais positivo, caso da amostra 974); no terceiro ponto o descasamento positivo favorece a formação dos PQs até um certo limiar onde começa ocorrer a coalescência entre os PQs, diminuindo a densidade caso da amostra 973. No gráfico da figura 4.46 observa-se que não ocorreu uma variação apreciável na altura entre as amostras 980 e 974 apenas na 973, onde a formação da coalescência diminuiu a altura dos PQs e provavelmente aumentou o tamanho da base. Não foi possível mostrar esse aumento do tamanho da base devido a limitação do AFM para esse tipo de medida.

O descasamento foi determinado de duas formas:

- I) Para amostras espessas da ordem de 500 nm utilizou-se a difração de Raios-X;
- II) Para amostras finas (da ordem de 1,5 nm) pela consulta a um gráfico do descasamento *versus* o fluxo de In (visto que do grupo III somente variou-se o In).

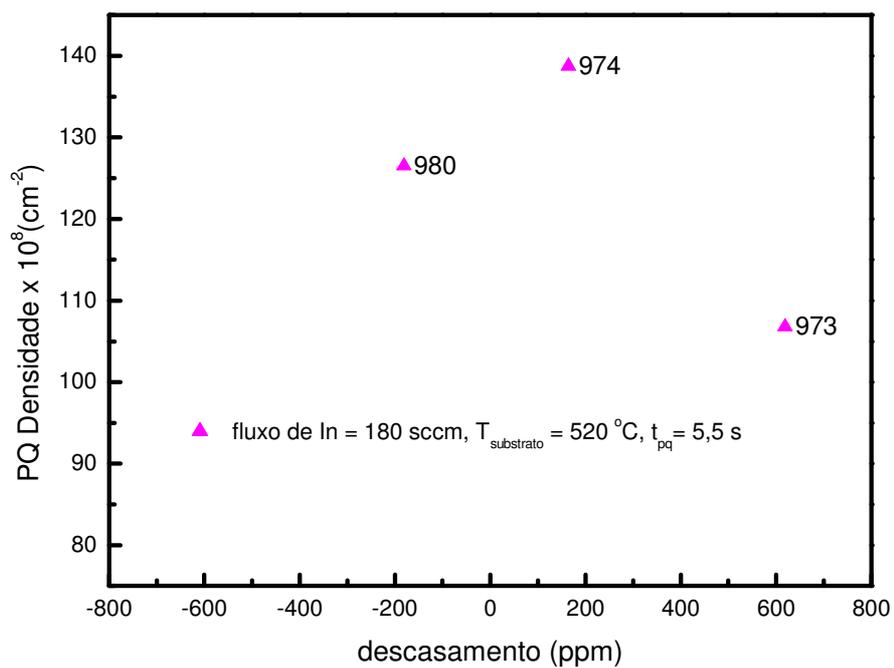


Figura 4.45 – Gráfico da densidade dos PQs *versus* o descasamento.

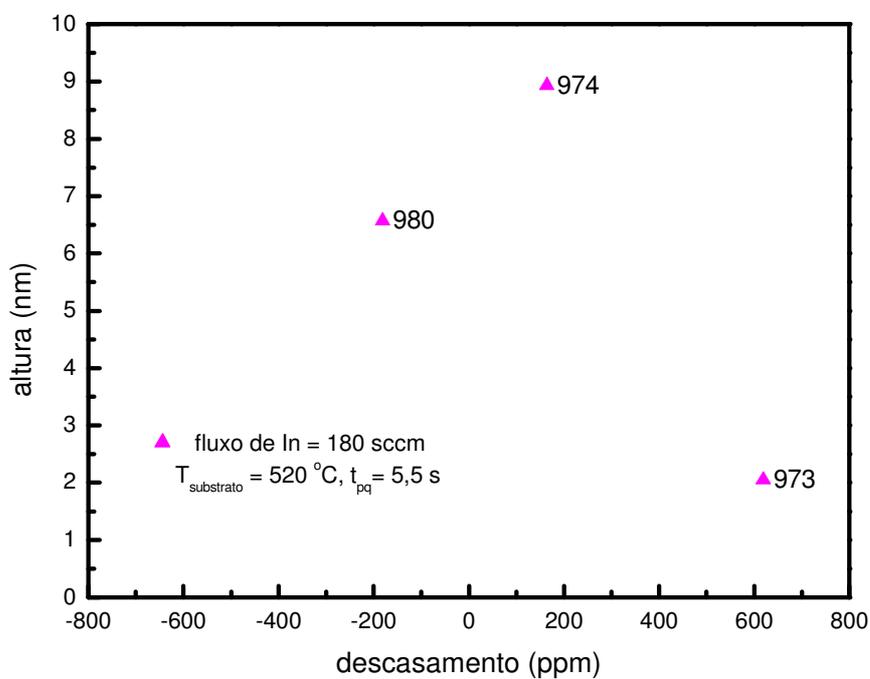


Figura 4.46 – Gráfico da altura dos PQs *versus* o descasamento.

Nos gráficos da figura 4.47 e 4.48 a maior densidade ocorreu para um tempo de 6,6 s e a menor altura para 5,5 s.

Para se fazer um QDIP é necessário maximizar a densidade de PQs na região ativa, de forma a se obter uma maior absorção do infravermelho incidente. Para isso após a maximização da densidade de PQs numa primeira camada, próximo passo é manter a mesma densidade nas camadas posteriores, visto que um QDIP compreende algo de 10 a 50 períodos. Conforme foi observado anteriormente para o sistema InAs / InGaAs a densidade planar de PQs começa a diminuir conforme se aumenta o número de camadas para evitar esse problema aumentou-se a espessura da camada intermediária entre cada camada de PQs para o sistema InAs/InGaAlAs.

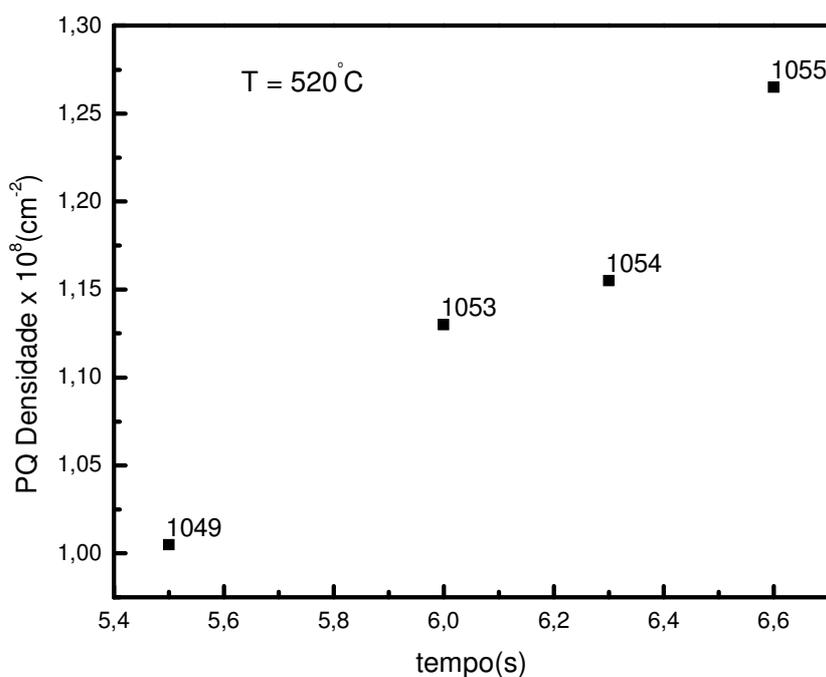


Figura 4.47 – Gráfico da densidade dos PQs de InAs *versus* o tempo de crescimento dos PQs de InAs sobre a liga InGaAlAs.

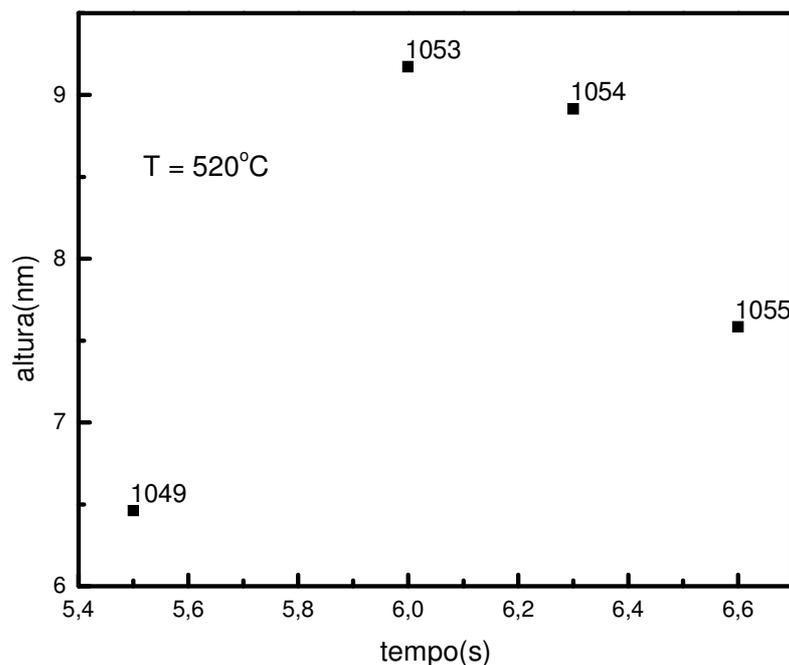


Figura 4.48 – Gráfico da altura dos PQs de InAs *versus* o tempo de crescimento dos PQs de InAs sobre a liga InGaAlAs.

Observa-se na figura 4.49 que aumentando a espessura da camada intermediária [54], a densidade planar de  $1,0 \times 10^{10}$  PQs /cm<sup>2</sup> para a 5<sup>a</sup> camada da amostra 978 se aproximou da densidade planar da 1<sup>a</sup> camada da amostra 974 que é de  $1,4 \times 10^{10}$  PQs /cm<sup>2</sup>.

A proposta do aumento da camada intermediária contribui também para redução do tamanho dos PQs conforme mostra a figura 4.50. Resolvido este problema o próximo passo foi crescer duas amostras com diferentes estruturas para QDIP. Para ambas as amostras foram crescidas uma camada tampão com 150 nm de espessura sob temperatura de 630°C seguida de uma camada dopada n de InGaAs casada com InP. Para a amostra 996, sobre a camada de InGaAs foi crescida uma camada de InGaAlAs com espessura de 109 nm com 16 % de Al na liga e casada com o substrato. Os PQs foram depositados por 5,5 s à 520 °C. Os PQs foram recozidos sob atmosfera de arsina por 12 s. Eles foram cobertos por uma camada de 13 nm de InP enquanto a temperatura se elevava até 600°C. Estas três diferentes camadas foram repetidas por 10 vezes. Uma camada de 60 nm de quaternário é crescida e finalmente uma camada de contacto dopada n de InGaAs é depositada. No caso da amostra 992 no topo do material casado

com o substrato com espessura de 99 nm e 16 % de Al na liga, o período da estrutura consistindo de 10 nm de InGaAs casado seguido de 3 nm do mesmo quaternário, no topo são nucleados PQs de InAs e cobertos por uma camada de InP, é depositado sob as mesmas condições da amostra 996. Para esta estrutura o número de períodos também é dez. Uma camada de 60 nm de quaternário é crescida e finalmente uma camada de contacto dopada n de InGaAs é depositada. Todas as camadas de ternários e quaternários foram crescidas à 600°C.

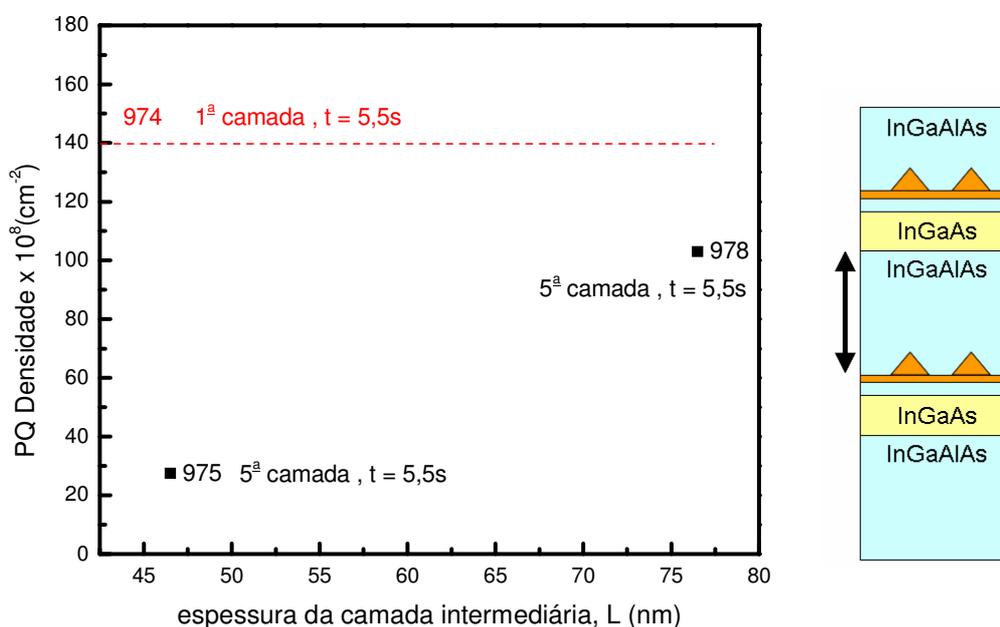


Figura 4.49 – Gráfico da densidade planar dos PQs de InAs *versus* a espessura da camada intermediária entre cada camada de PQs de InAs sobre a liga InGaAlAs.

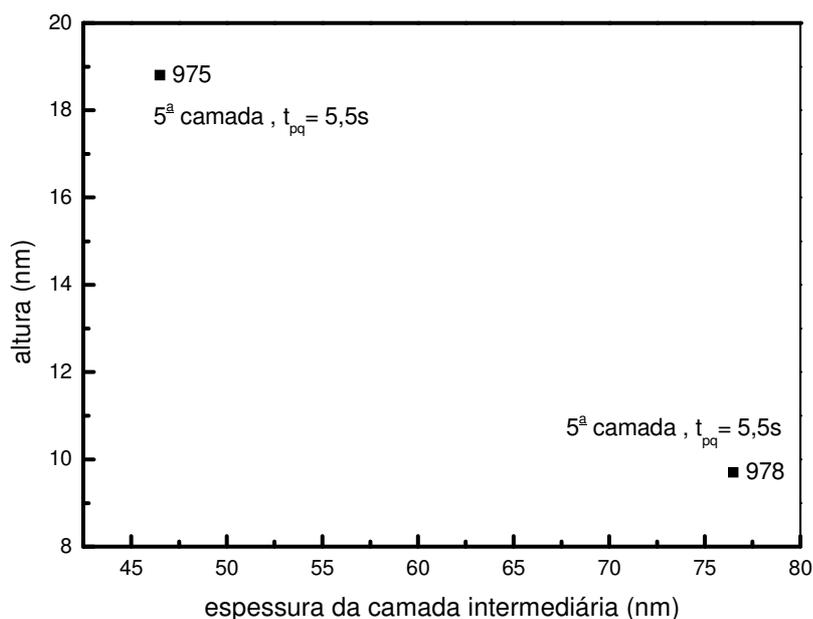


Figura 4.50 – Gráfico da altura dos PQs de InAs *versus* a espessura da camada intermediária entre cada camada de PQs de InAs sobre a liga InGaAlAs.

A figura 4.51 mostra o diagrama da banda de condução das amostras investigadas. As camadas de contacto foram dopadas em  $1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . De acordo com as micrografias de microscopia de força atômica das amostras de controle onde os PQs foram deixadas descobertas, as densidades planar dos PQs foi de  $1,5 \times 10^{10} \text{ PQs / cm}^2$  e a altura média foi de 9 nm para ambas as amostras. As micrografias de microscopia de transmissão eletrônica mostraram uma simetria cilíndrica nos PQs, formato de lente, com uma base de aproximadamente 50 nm e confirmando a altura média de 9 nm. A composição do quaternário foi escolhida de forma a maximizar a densidade planar de PQs. De forma a manter a densidade planar e a altura inalterada após o crescimento de 10 camadas, uma espessa camada de InGaAlAs foi escolhida.

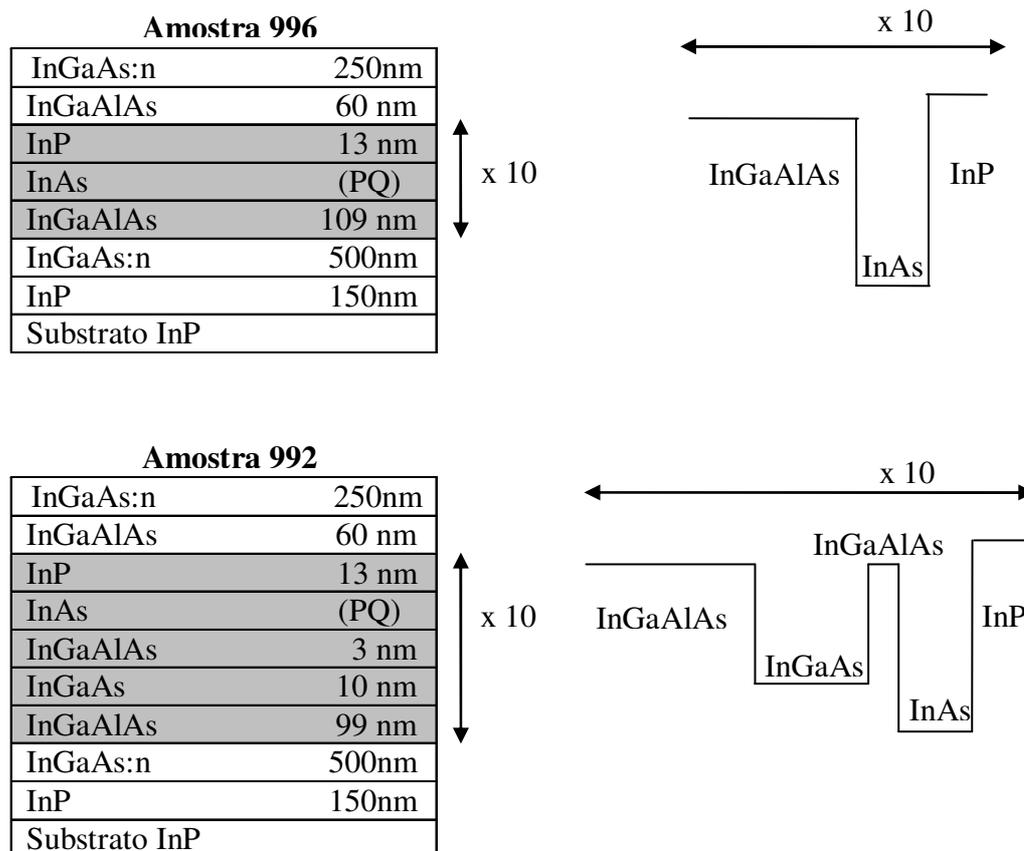


Figura 4.51 – Estruturas das amostras 996 e 992 com seus respectivos diagramas de condução.

As amostras foram caracterizadas pelas medidas de fotocorrente usando a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier como função da temperatura e da polarização da luz incidente. Os espectros de Fourier mostrados foram todos obtidos com mesmo ganho sem voltagem externa. A fotocorrente é da ordem de dezenas de pico Ampère.[55]

A figura 4.52a mostra o espectro de fotocorrente como função da temperatura para a amostra 996 mostrando um forte pico em  $6,6 \mu\text{m}$  e um pico mais fraco alargado centrado por volta de  $4,3 \mu\text{m}$ . Estes espectros foram obtidos por incidência normal, demonstrando a possibilidade do uso de tais estruturas para detecção por incidência normal de radiação e foram corrigidas pela resposta espectral do sistema. O valor de  $\Delta\lambda / \lambda$  para o pico de  $6,6 \mu\text{m}$  é somente 11%, indicando uma transição entre níveis ligados. Observa-se um sinal presente a 120 K. A intensidade do pico aumenta com a

temperatura até 60 K e então decresce com a temperatura, conforme o gráfico interno à figura 4.52a. O máximo no pico de intensidade é atribuído ao crescimento na população do estado inicial da transição óptica envolvida. A amostra é nominalmente não dopada, então se espera que somente o estado fundamental esteja populado por portadores provenientes das camadas de contacto e algumas impurezas residuais. Apesar de que transições óticas do estado fundamental para estados imediatamente excitados levariam os portadores para um estado profundo. Considerando que as barreiras de InGaAlAs têm 100 nm de espessura, isto tornaria impossível o tunelamento dos portadores de forma a contribuir para a corrente detectada. Transições do estado fundamental para níveis no continuum serão detectadas para comprimentos de onda abaixo de 3,5  $\mu\text{m}$ . [55]

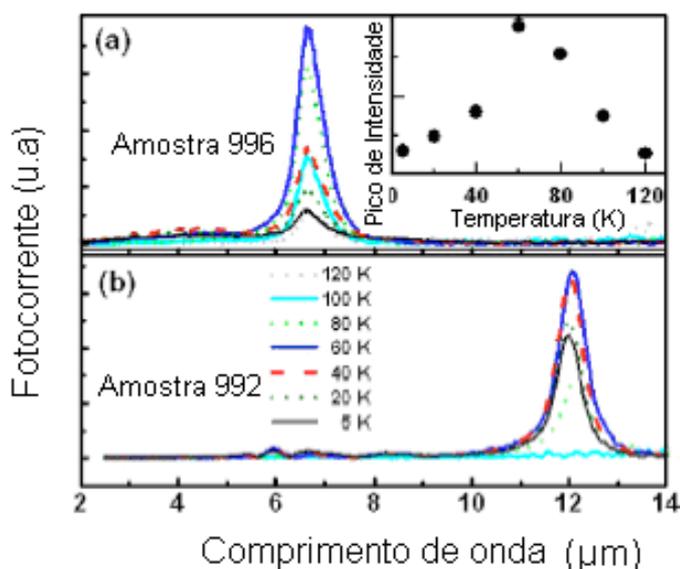


Figura 4.52 – a) Fotocorrente *versus* o comprimento de onda para a amostra 996 e um gráfico interno do pico de intensidade *versus* a temperatura. b) Fotocorrente *versus* o comprimento de onda para a amostra 992.

A dependência com a temperatura do espectro de fotocorrente da amostra 992 é mostrada na figura 4.52b. Um intenso e estreito pico é observado em 12,1  $\mu\text{m}$  e um outro pico mais fraco é detectado em 5,9  $\mu\text{m}$ . Um resultado importante é que a razão  $\Delta\lambda / \lambda$  para o pico de baixa energia é de somente 5,3 %, o menor valor já reportado. A

fotocorrente da amostra 992 tem o mesmo comportamento quanto à temperatura que a da amostra 996. Para confirmar a afirmação que a intensidade máxima é devida a um aumento na população do estado inicial da transição ótica, foi medida a fotocorrente como função da temperatura para uma amostra equivalente a amostra 992, exceto por estar intencionalmente dopada com mais de dois elétrons por PQ. Neste caso a intensidade da fotocorrente permaneceu inalterada para temperaturas superiores a 60 K devido o estado inicial estar já populado e então decresce monotonicamente.[55]

O interessante das estruturas tais como a amostra 992 é que pela simples mudança na espessura do poço quântico de InGaAs e da barreira de InGaAlAs do topo, os picos de fotocorrente para diferentes comprimentos de onda entre 4 e 12,5  $\mu\text{m}$  podem ser detectados. Além disso, os picos observados para diferentes estruturas que foram estudadas são extremamente finos, com  $\Delta\lambda / \lambda$  equivalente aos das outras amostras aqui mostradas. Tais estruturas são interessantes para detecção seletiva de comprimento de onda. [55]

Medidas dependentes da polarização foram realizadas a 5 K usando uma geometria de guia de onda. Nesta configuração, observa-se que quando a polarização p é incidente na borda da amostra, o campo elétrico está parcialmente no plano da amostra e parcialmente perpendicular às camadas. Escolhendo a polarização s acarreta que o campo elétrico está totalmente no plano das camadas.

A dependência com a polarização da fotocorrente para a amostra 992 é mostrada na figura 4.53, onde, tal e qual a amostra 996, um intenso sinal é observado para a polarização p da luz incidente. Foi observada a mesma dependência com a polarização para amostra equivalente a amostra 992, porém dopada. Também foi observado um forte sinal de fotocorrente para a polarização s, demonstrando um grande potencial para detecção de radiação normal incidente para comprimentos de onda superiores a 10  $\mu\text{m}$ .

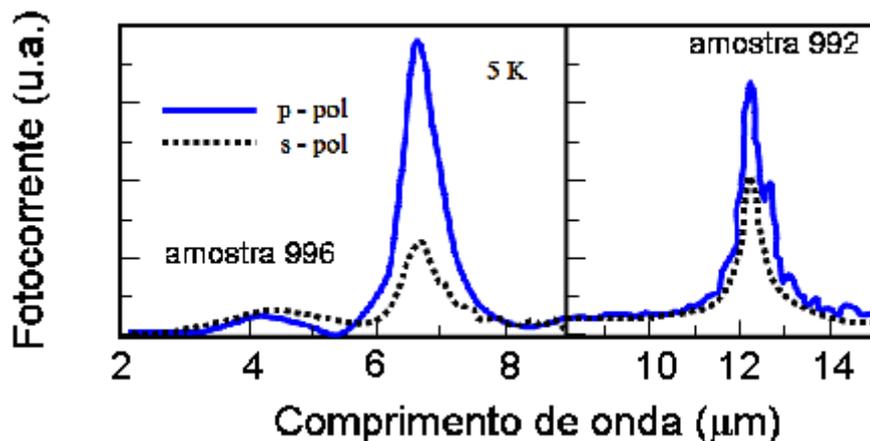


Figura 4.53 – a) Fotocorrente *versus* o comprimento de onda para a amostra 996.  
b) Fotocorrente *versus* o comprimento de onda para a amostra 992.

De acordo com o estudo realizado de pontos quânticos de InAs nucleados sobre InGaAlAs para a obtenção de uma densidade planar de PQs  $1,5 \times 10^{10}$  PQs /cm<sup>2</sup> e a altura média foi de 9 nm e uma base de aproximadamente 50 nm, deve-se utilizar um tempo de deposição de 5,5s, uma temperatura do substrato de 520 °C, um recozimento de cerca de 12 s. Para se avaliar a contribuição da inclusão do poço quântico e da fina barreira de InGaAlAs foram crescidas estruturas de PQs de InAs sobre diferentes configurações: InGaAlAs *bulk* (amostra 996) e sobre uma barreira de 1,5 nm de InGaAlAs sob ação de poço quântico de InGaAs (amostra 992). Dessas estruturas foram crescidos e processados dois dispositivos, onde na amostra 992 medindo-se a fotocorrente foi detectado um pico de 12,1 μm, com razão  $\Delta\lambda / \lambda$  de somente 5,3 %, e um outro pico mais fraco em 5,9 μm. Já para a amostra 996 medindo-se a fotocorrente foi detectado um forte pico em 6,6 μm, com razão  $\Delta\lambda / \lambda$  de 11%, e um pico mais fraco alargado centrado por volta de 4,3 μm. Estes espectros foram obtidos por incidência normal, demonstrando a possibilidade do uso de tais estruturas para detecção por incidência normal de radiação.