

## 4

### Resultados e discussão

#### a) Calibração dos parâmetros de crescimento

A tabela 4.1 apresenta os valores dos parâmetros obtidos nas diversas amostras crescidas no reator MOVPE (esquema na figura 3.4 – pág 88). As duas últimas colunas apresentam respectivamente o comprimento de onda da transição intrabanda  $E_2-E_1$  e o tipo de transição, obtidos com base no gráfico teórico da figura 2.12 (pág. 60):

Amostra	$L_w$ (Å)	$L_b$ (Å)	x	$N_d$ ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )	$L_c^s$ (µm)	$L_c^i$ (µm)	$Q_p$	$E_2-E_1$ (µm)	Tipo transição
#916	49	275	0,28	1,00	2,0	1,0	50	9,2	B-C
#928	39	325	0,25	0,35	2,0	1,0	50	12,4	B-C
#929	30	289	0,26	0,65	2,0	1,0	50	14,6	B-C
#930	42	308	0,27	0,65	0,5	0,5	50	10,3	B-C

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros obtidos nas diversas amostras crescidas.

Para calibração da taxa de crescimento do material da barreira e da composição de Al na liga, é crescida uma camada de 400nm de AlGaAs sobre um substrato de GaAs não dopado, selecionando o tempo e o fluxo dos gases de TMAI, TMGa e AsH<sub>3</sub> baseado no histórico de crescimentos do reator MOVPE. Em seguida, é feita uma análise de difração de raios x da amostra. A partir do espectro resultante obtêm-se os valores da espessura e da composição de Al. As figuras 4.1 e 4.2 apresentam as duas análises feitas com o espectro de difração de raios x usado na calibração das amostras #928, #929 e #930. A distância entre os dois picos centrais está relacionada com a composição de Al. As distâncias entre os picos laterais está relacionada com as franjas de interferência geradas pela camada de AlGaAs crescida sobre GaAs. A partir dos valores medidos, realiza-se a correção nos parâmetros do reator.

Para calibração da taxa de crescimento do material do poço, não é possível repetir o mesmo procedimento da barreira, pois em termos de difração de raios x

não há diferença entre o material do poço e o do substrato. Portanto, é crescida uma estrutura MQW, de modo que os picos de interferência obtidos no espectro representam o período (barreira + poço) dessa estrutura. Sabendo o valor da espessura da barreira, obtém-se o valor para o poço. Uma maneira mais precisa de se realizar essa medida é usando o programa de simulação computacional *RADS Mercury* (fornecido com o difratômetro), que simula o espectro de difração teórico esperado para uma determinada estrutura (informada pelo usuário). Esse programa também calcula iterativamente a curva teórica que melhor se ajusta a um determinado espectro medido. Na figura 4.3 (#930), a curva em preto é a medida real no difratômetro de raios x, enquanto que a curva em vermelho representa o ajuste feito através da simulação computacional no programa. Essa simulação é mais precisa porque também corrige pequenas variações na espessura da barreira e na composição de Al.

Os níveis de dopagem no poço/camadas de contato foram calibrados através de medidas de efeito Hall.

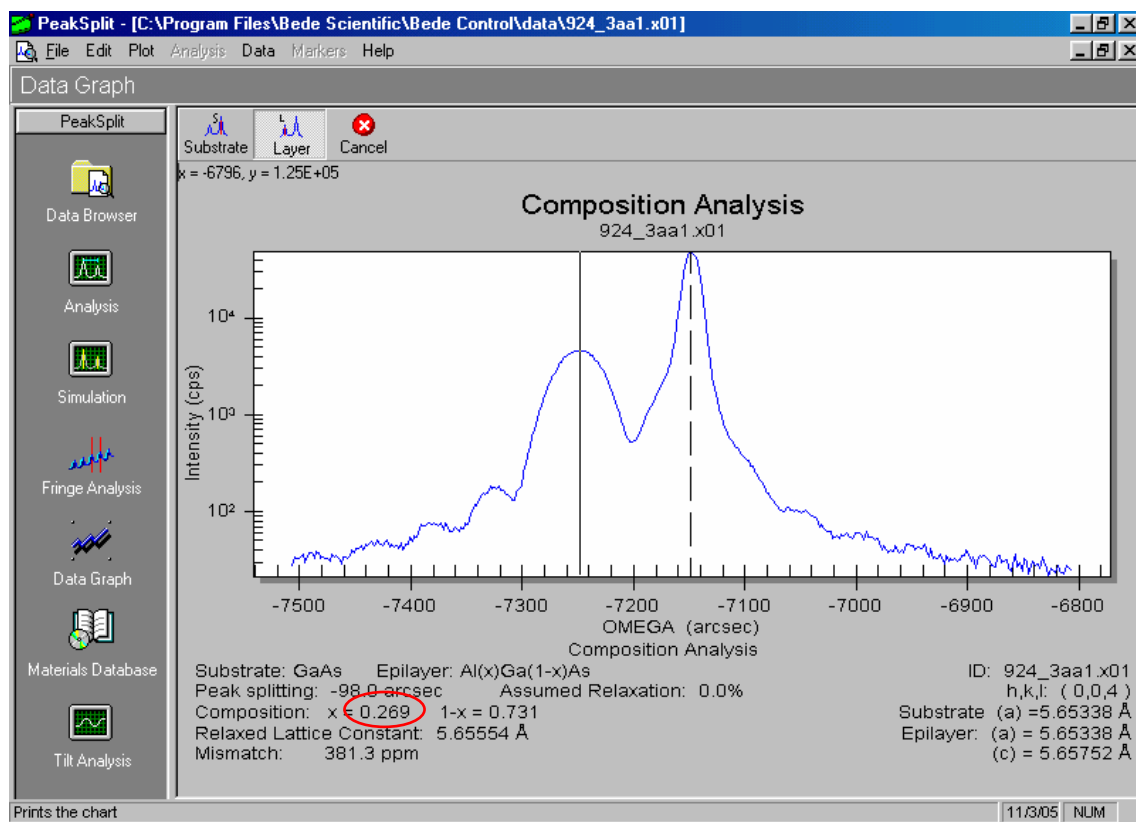


Figura 4.1 – Espectro de raios x usado para a calibração da composição de Al na barreira.

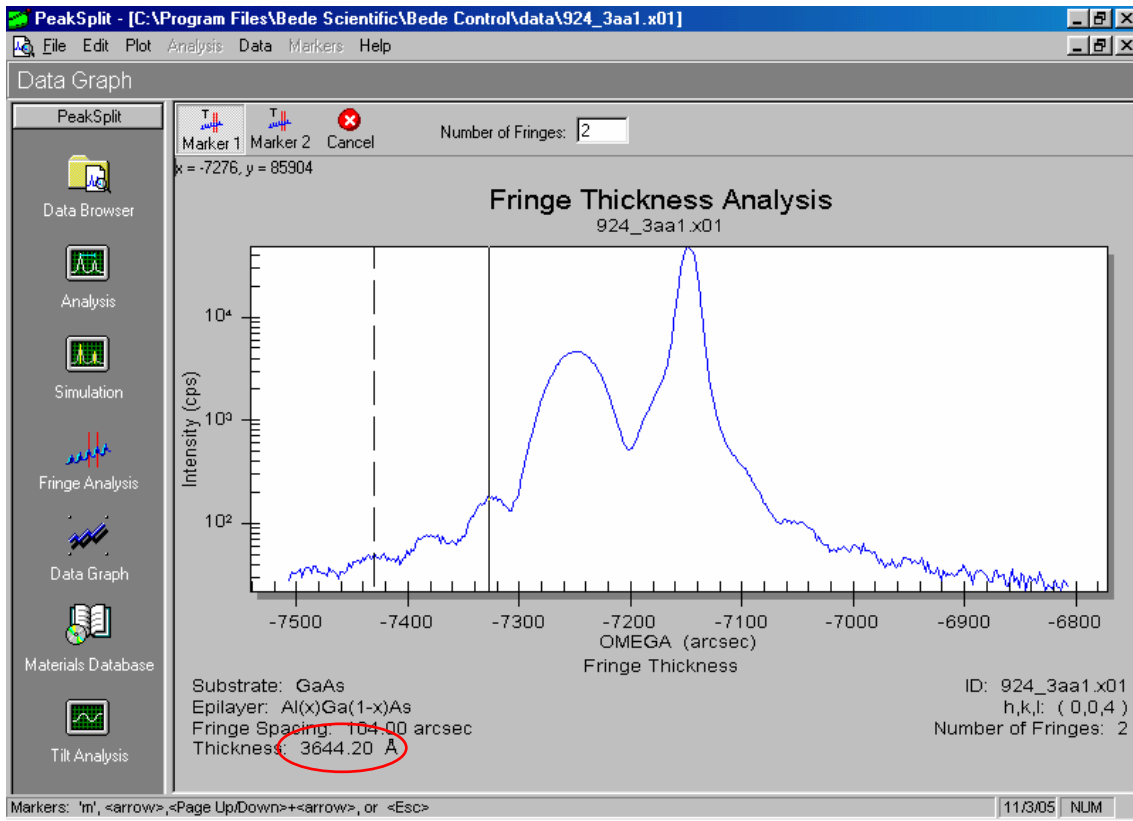


Figura 4.2 - Espectro de raios x usado para a calibração da espessura da barreira.

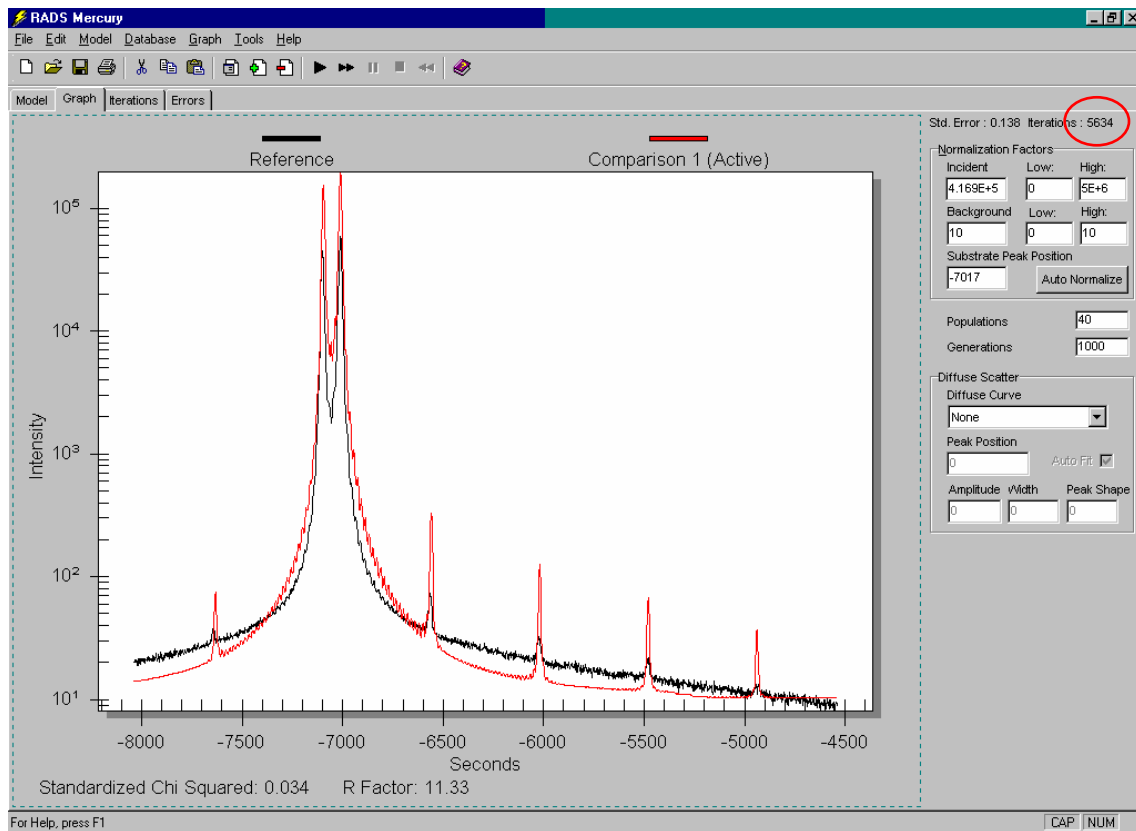


Figura 4.3 – Simulação computacional usada para a calibração da espessura do poço (#930).

Foram realizadas medidas dos espectros de fotoluminescência a 300K e a 15K, que fornecem a energia de transição banda-banda do tipo e1-hh1, a partir da qual se pode estimar a espessura do poço. A figura 4.4 apresenta os espectros de fotoluminescência das amostras, a 300K e 15K e potência do laser incidente de 3mW e 70 $\mu$ W, respectivamente.

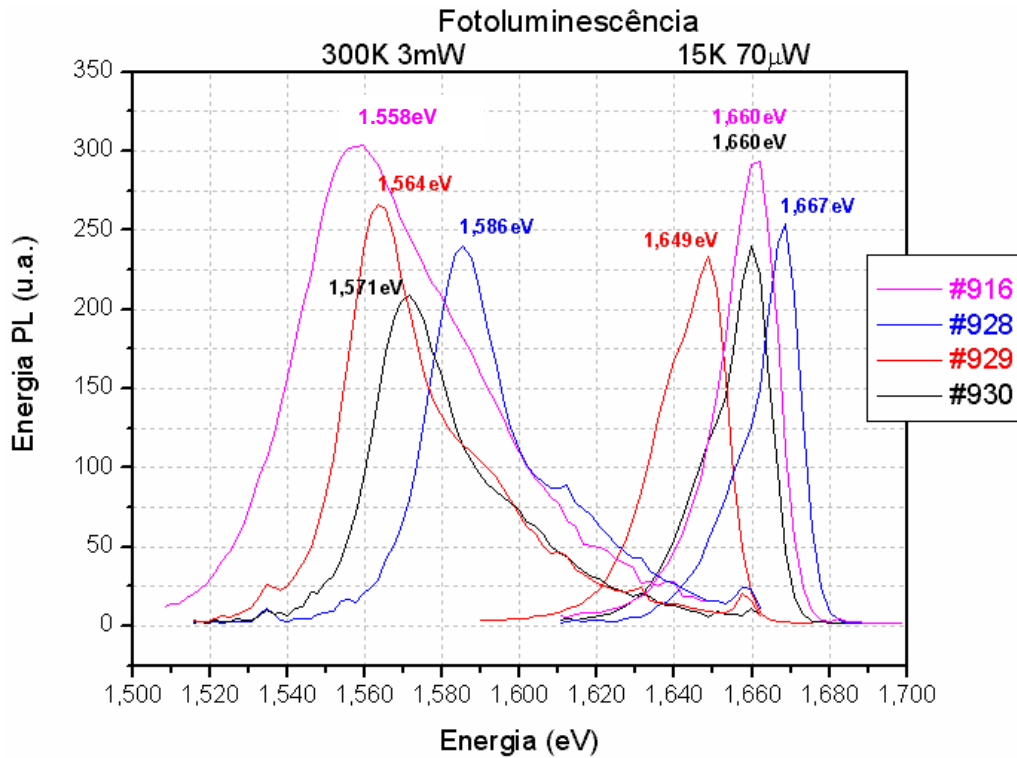


Figura 4.4 – Espectros de fotoluminescência das amostras a 300K.

A figura 4.5 apresenta um gráfico teórico da energia de transição e1-hh1 em função da espessura do poço, para as proporções de 20%, 27% e 30% de Al na barreira. Esse gráfico foi calculado a partir do programa *Spectrum*, desenvolvido no LabSem (Pires *et al*, 2000), seguindo o modelo de barreira finita (apresentado no capítulo 2). Também foram acrescentados os dados relativos às medidas de fotoluminescência e de espessura do poço a partir dos espectros de raios x.

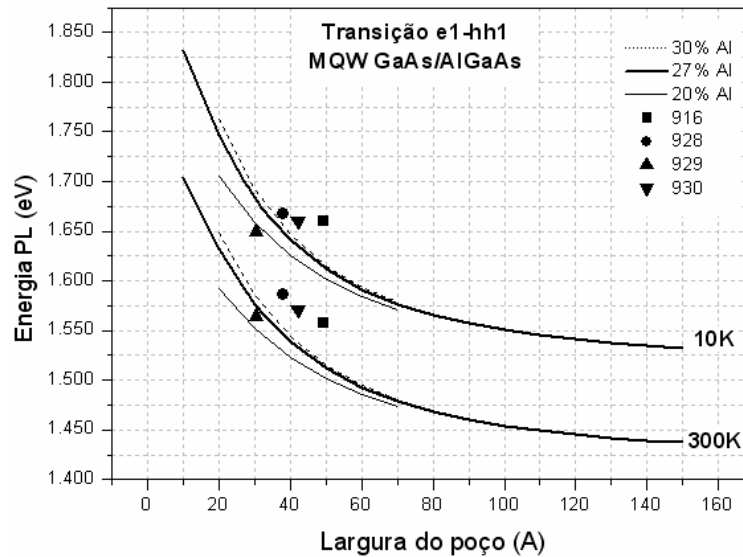


Figura 4.5 – Gráfico teórico da energia de transição e1-hh1 em função da espessura do poço, a 300K e a 10K.

**b) Corrente de escuro**

A figura 4.6 apresenta as curvas de corrente de escuro em função da tensão de polarização para as amostras desenvolvidas, T = 300K.

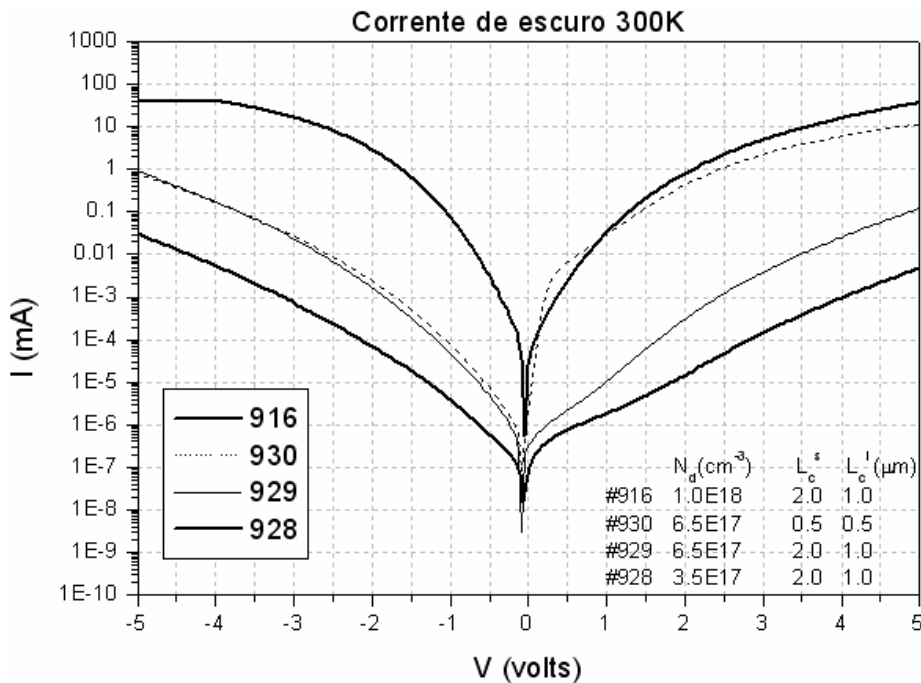


Figura 4.6 – Corrente de escuro em função da tensão de polarização, a 300K.

Verifica-se que as amostras com maior dopagem apresentam maior corrente de escuro, pois há uma quantidade maior de elétrons disponíveis para serem

excitados termicamente. Entretanto, a amostra #930, que em princípio deveria apresentar a mesma curva  $I \times V$  da #929, já que elas possuem a mesma dopagem (apesar das camadas de contato da #930 serem mais finas), apresenta uma corrente mais alta para tensões positivas, chegando a ultrapassar a curva da amostra #916 (em torno de 0,5V).

As figuras 4.7a e 4.7b apresentam curvas  $I \times V$  da #929 e #930, respectivamente, em 300K e 77K. Verifica-se que, para tensões positivas, #930 apresenta uma corrente de escuro mais alta.

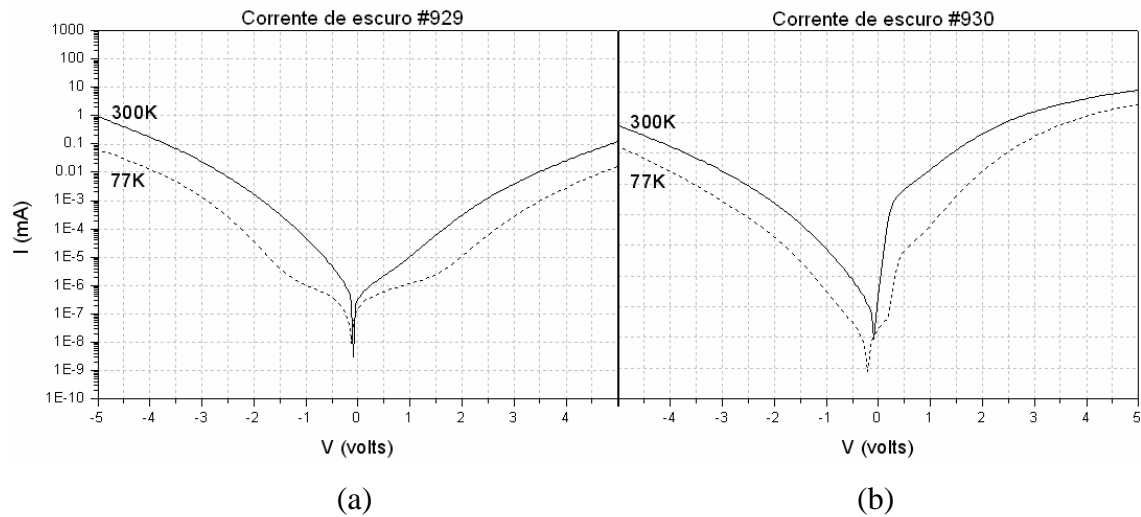


Figura 4.7 – Curvas  $I \times V$  em 300K e 77 das amostras (a) #929 e (b) #930.

A figura 4.8 apresenta curvas  $I \times V$  da #916 em 300K e 77K, além das curvas a 77K das amostras #929, #930 e #930 submetida ao recozimento RTA. Verifica-se que a corrente de escuro da #916 varia muito pouco com a temperatura em comparação com #929 e #930 (figuras 4.7a e b). Verifica-se também que a corrente de escuro da #930 é maior que para a #929 para valores positivos de  $V_B$ , mantendo o comportamento observado a 300K (figura 4.6), assim como a corrente de escuro da #930 foi reduzida em até uma ordem de grandeza após o tratamento térmico.

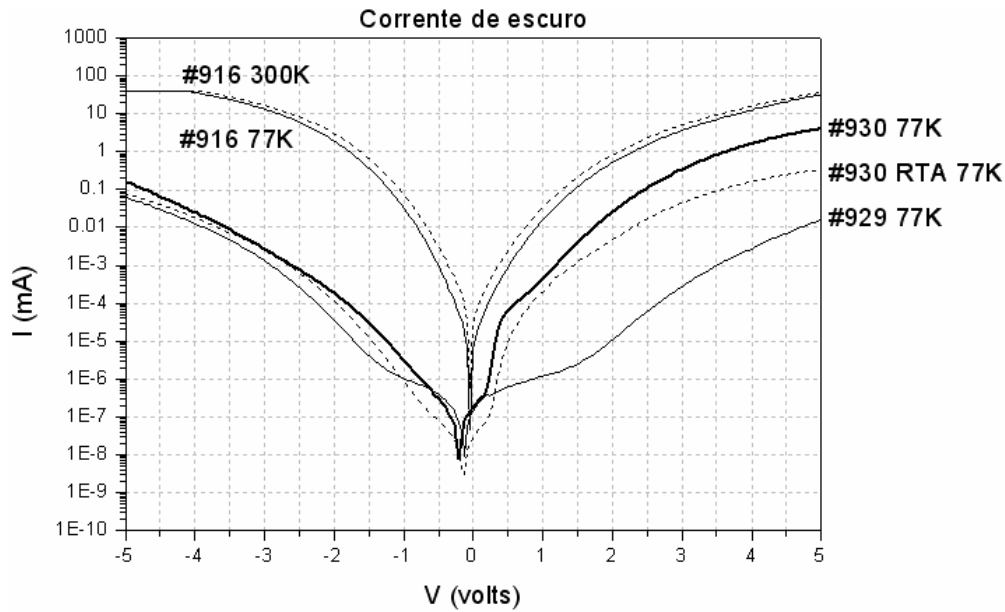


Figura 4.8 - Curvas IxV da amostra #916 entre 300K e 77K, e #929, #930 e #930 RTA a 77K.

### c) Espectros de absorção de IR

A figura 4.9 apresenta os espectros absorção das amostras a 77K, entre 1,5 e 24 $\mu$ m. Existem dois grandes picos de absorção, em 2 e 20 $\mu$ m, que provavelmente estão associados a erros na varredura e/ou na subtração do *background* nos extremos da faixa de IR suportada pelo espectrômetro FTIR, já que não são esperadas transições eletrônicas nestes comprimentos de onda.

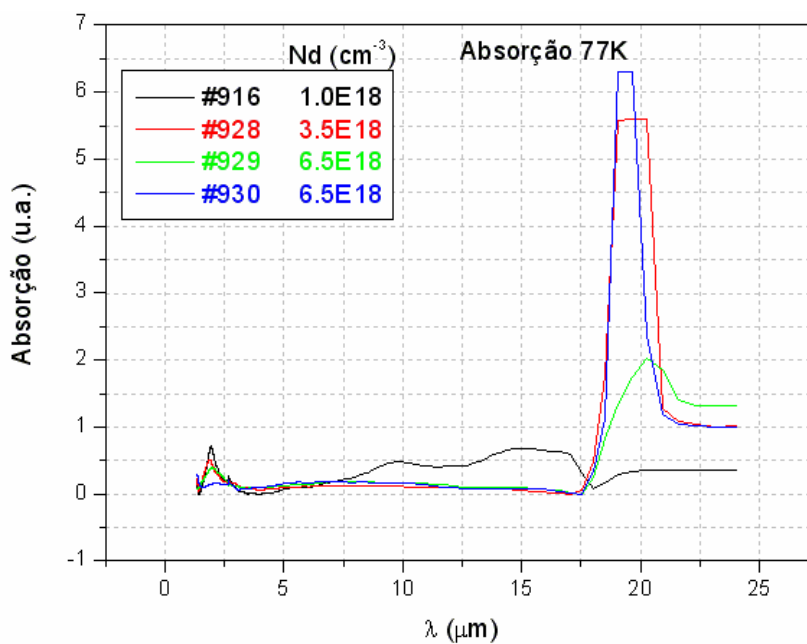


Figura 4.9 – Espectros de absorção das amostras a 77K, entre 1,5 e 24 $\mu$ m.

A figura 4.10 apresenta os mesmos espectros medidos na figura 4.9, mas exibe apenas a região do IR entre 3,5 e 17 $\mu\text{m}$ , a fim de se observar com maior detalhe as características de absorção das amostras nesta faixa de comprimentos de onda.

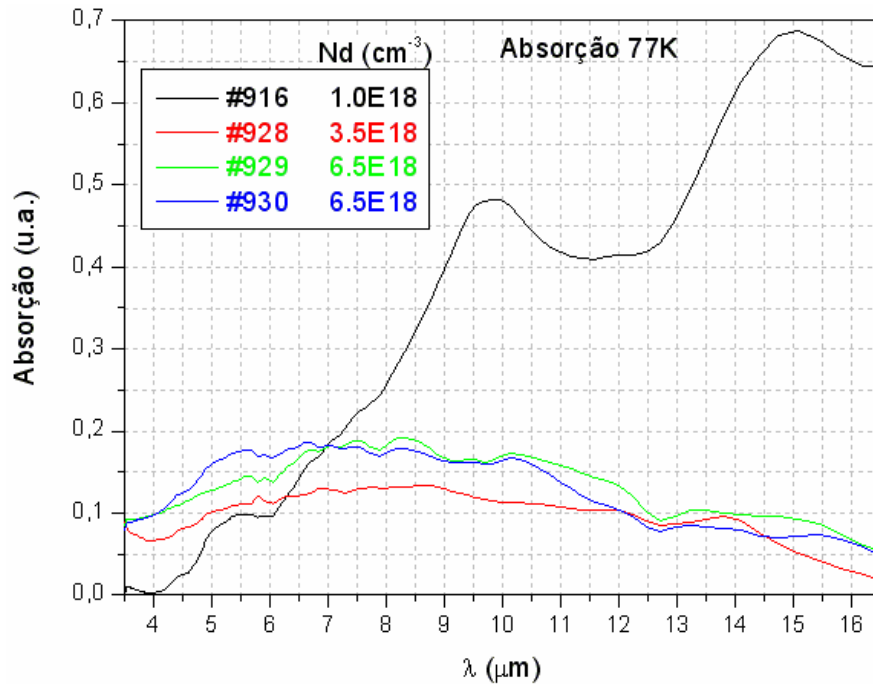


Figura 4.10 – Espectros de absorção das amostras a 77K, entre 3,5 e 17 $\mu\text{m}$ .

Verifica-se que a amostra #916, que possui o maior nível de dopagem, apresenta o maior nível de absorção, com dois picos, centrados em 10 $\mu\text{m}$  e 15 $\mu\text{m}$ . As amostras #929 e 930 apresentam espectros semelhantes, mas sem picos bem definidos, enquanto que a #928 apresenta o menor nível de absorção, possuindo também o menor nível de dopagem.

Verifica-se que a capacidade de absorção das amostras depende do nível de dopagem nos poços, independente das espessuras das camadas de contato de GaAs:n. Os elétrons oriundos da dopagem preenchem o primeiro nível de energia dentro da banda de condução do poço, aumentando a transição intrabanda e conseqüentemente, a absorção da radiação incidente. Entretanto, é necessária uma análise mais detalhada desses espectros de absorção, uma vez que aparentemente não possuem forma compatível com as curvas de fotocorrente medidas e apresentadas a seguir. Apesar dos espectros de absorção das amostras #929 e #930 serem semelhantes, só na segunda foi possível medir espectros de fotocorrente



entre os contatos elétricos em função da tensão de polarização  $V_B$  e da temperatura. A curva de absorção da #916 parece indicar que as curvas de fotocorrente serão obtidas, mas nenhum resultado é obtido, devido ao ruído.

#### d) Espectros de fotocorrente

Houve grande dificuldade em se obter os espectros de fotocorrente das amostras #916, #928 e #929. Observou-se que, devido às camadas de contato superior e inferior dessas amostras serem muito espessas ( $2\mu\text{m}$  e  $1\mu\text{m}$ , respectivamente), aumentando a absorção de fótons por portadores livres na banda de condução do GaAs, havia excesso de ruído prejudicando as medidas.

A figura 4.11 apresenta os espectros de fotocorrente em função da tensão aplicada na amostra #930. Observa-se um pico de fotocorrente centrado em  $9\mu\text{m}$ . Verifica-se também que as amostras que foram submetidas ao recozimento RTA, após a etapa de metalização dos contatos elétricos, responderam com níveis de fotocorrente mais intensos.

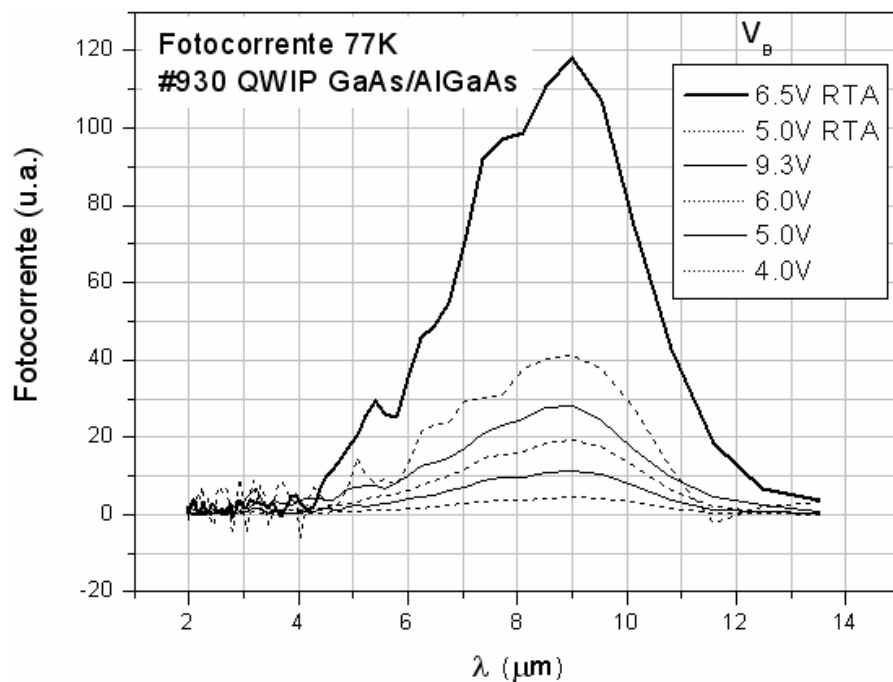


Figura 4.11 – Espectros de fotocorrente da #930 a 77K para várias tensões de polarização.

A figura 4.12 apresenta os espectros de fotocorrente da #930 entre 80K e 5K, para uma tensão de polarização de +6V. Estas medidas foram realizadas em

outro espectrômetro FTIR, pertencente ao *Photonics Institute and Center for Micro and Nanostructures*, da *Technical University Vienna*, Áustria), no qual era possível controlar a temperatura da amostra para medir a fotocorrente. Os picos das curvas medidas abaixo de 50K apresentam uma atenuação em  $9\mu\text{m}$  associada ao *background* do sistema (janela do criostato, sistema óptico do espectrômetro, etc), que não foi subtraído das medidas. Verifica-se que em temperaturas abaixo de 80K a fotocorrente é bem mais intensa. Entretanto, como a escala vertical tanto dessa figura como da figura 4.11 é arbitrária, não possuindo unidade bem definida, não é confiável fazer comparações entre os resultados obtidos com cada um dos espectrômetros usados. Para realizar medidas de resposta espectral e detectividade com unidades padronizadas, é necessário uma fonte de IR com potência óptica calibrada, ou um detector com curva de calibração conhecida. Os espectrômetros usados neste trabalho não possuem curvas de calibração.

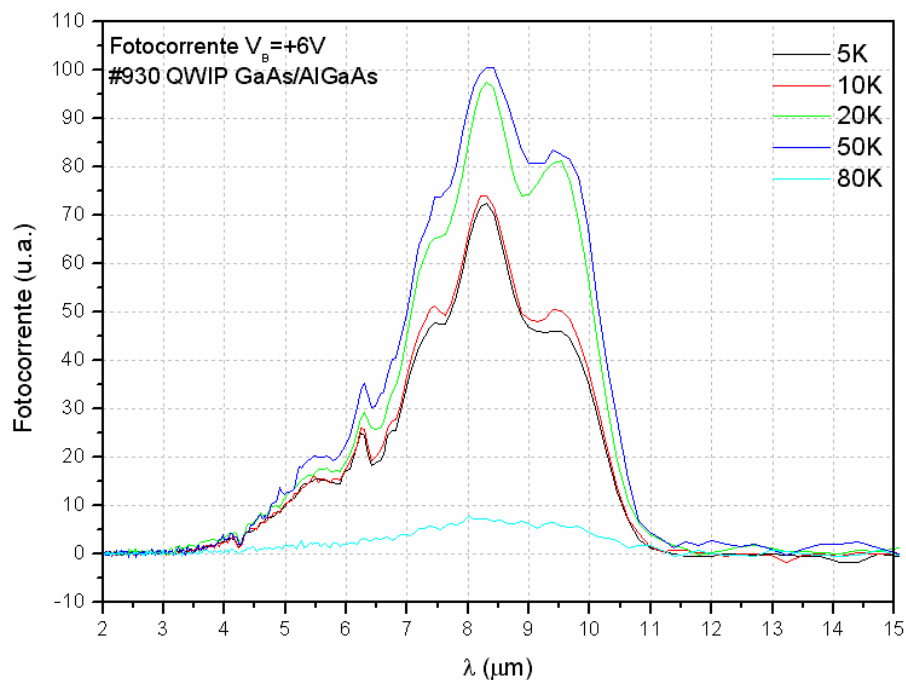


Figura 4.12 – Fotocorrente da #930 com  $V_B=+6V$  entre 80K e 5K.

A figura 4.13 apresenta os espectros de fotocorrente, medidos a 77K para várias tensões de polarização, da amostra #897, crescida no LabSem, que se trata de uma estrutura QWIP com poços de InGaAs e barreiras de InAlAs, com pico de detecção em  $4,3\mu\text{m}$ . Essa amostra apresenta um desempenho superior aos QWIPs de GaAs/AlGaAs, mostrando que é possível melhorar bastante o projeto e a

confeção dos detectores em  $10\mu\text{m}$ , tanto em termos dos parâmetros de crescimento das estruturas semicondutoras, quanto em termos de qualidade dos contatos elétricos. Para  $V_B=+4\text{V}$ , a fotocorrente atinge a melhor condição, diminuindo de intensidade para tensões menores, e ficando mais ruidosa para tensões mais altas. Para tensões negativas, as curvas de fotocorrente apresentam maior ruído.

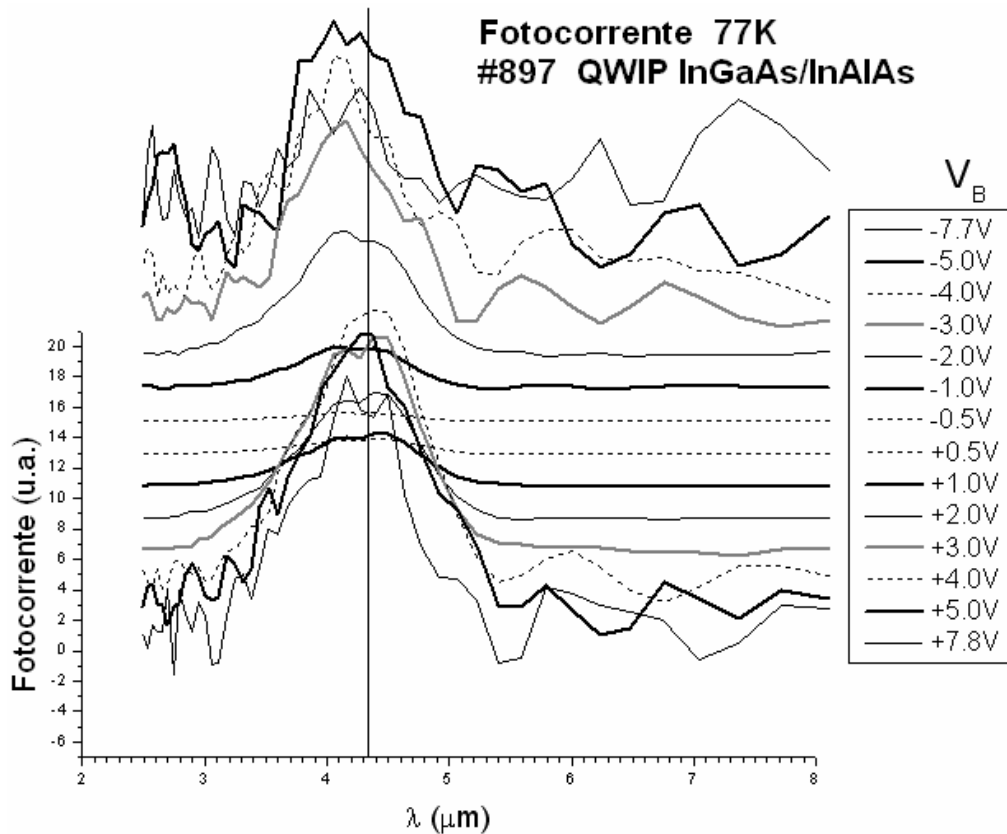


Figura 4.13 – Fotocorrente da #897 a 77K para várias tensões de polarização.