

ESPELHOS DE BRAGG DO SISTEMA AlGaAsSb/AlAsSb DOPADO COM Te SOBRE InP

G. Nicolodelli^{1*}; D.O. Toginho Filho¹; I.F.L. Dias¹; J.L. Duarte¹; E. Laureto¹; J.C. Harmand²

¹ UEL, Departamento de Física, Laboratório de Óptica e Optoeletrônica, C.P. 6001, 86051-970, Londrina (PR), Brazil.

² CNRS, Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, Route de Nozay, 91460, Marcoussis, France

Recebido: 29 de setembro, 2006; Revisado: 15 de dezembro, 2006

Palavras-chave: refletividade, absorção, fotoluminescência, VCSEL

RESUMO

Espelhos de Bragg do sistema AlGaAsSb/AlAsSb com 6,5 e 20,5 períodos, não dopado e dopados com Te, preparados pela técnica de epitaxia por feixe molecular, são analisados utilizando medidas de SIMS, refletividade e fotoluminescência. Verificamos, o surgimento de flutuações de potencial nas amostras de espelho de Bragg dopadas, associadas a macro flutuações na concentração de Te, na direção de crescimento detectadas por medidas de SIMS. A refletividade do espelho de Bragg é pouco afetada pela dopagem e pela presença das macro flutuações, mostrando que o sistema AlGaAsSb/AlAsSb é uma boa alternativa para a fabricação e VCSEL.

ABSTRACT

AlGaAsSb/AlAsSb undoped and Te doped Bragg mirrors with 6,5 and 20,5 periods, grown by molecular beam epitaxy are analysed using SIMS, reflectivity and photoluminescence. We verify the presence of potential fluctuations in the doped samples associated to the macro fluctuations in the Te profile concentration in the growth direction detected by SIMS. The results show that the Bragg mirror reflectivity is not significantly dropped by the doping and the macro fluctuations. The AlGaAsSb/AlAsSb system seems to be a good alternative for VCSEL technology

1. INTRODUÇÃO

Ligas de materiais semicondutores do tipo III-V com antimônio, crescidas em condição de rede casada sobre substrato de InP, são de grande interesse para a preparação de estruturas empregadas em dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos que operam na região entre 1,0 μm e 2,0 μm [1]. Devido ao alto contraste de seu índice de refração, as estruturas do tipo AlGaAsSb/AlAsSb [2] e GaAsSb/AlAsSb [3], parecem ser uma boa alternativa para a tecnologia de espelhos de Bragg [4] - DBR (Distributed Bragg Reflector) em lasers verticais com emissão pela superfície - VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser).

As propriedades necessárias aos DBRs para apresentarem um bom desempenho nos VCSEL são a refletividade excedendo 99% e a baixa resistência elétrica em série. A alta re-

fletividade é obtida empregando materiais que permitam um grande contraste do índice de refração (Δn), e um número suficiente de camadas de quarto de onda. A baixa resistência elétrica requer um alto nível de dopagem nestes materiais [5] e uma baixa diferença de potencial na descontinuidade ΔE_c da banda de condução (ΔE_v na banda de valência), para condução tipo-n (tipo-p).

A liga quaternária $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ apresenta “gap” direto em condição de rede casada com o InP, com a concentração de Al entre $0 \leq x \leq 0,40$. Em condição de rede casada com o InP, a liga ternária AlAsSb apresenta “gap” indireto, sendo o vale X o de menor energia, para qualquer concentração de As. O “off-set” da banda de condução ΔE_c (Γ -X) no sistema AlGaAsSb/AlAsSb é relativamente grande (~ 470 meV) [6] na faixa de concentração do Al, típica para fabricação de espelhos de Bragg ($x \sim 0,1$), sendo necessário um nível relativamente alto de dopagem e/ou alteração da estrutura na interface para melhorar a condutividade elétrica.

A dopagem com alta concentração de impurezas implica em uma série de mudanças nas propriedades físicas dos materiais semicondutores, tais como a redução da energia de ionização [7], o deslocamento da borda fundamental de absorção [8], o aumento da densidade de estados na vizinhança da borda do “gap” e a diminuição da energia do “gap” fundamental [9,10]. Estas variações podem interferir nas propriedades ópticas dos materiais constituintes dos espelhos de Bragg e devem ser consideradas para o “design” dos espelhos.

A liga AlGaAsSb não dopada nominalmente, apresenta uma impureza residual não excitônica [11], atribuída a defeitos nativos do tipo vacância de gálio e gálio no sítio do antimônio ($V_{\text{Ga}}\text{GaSb}$) [12]. Em análise de espectros de PL com variação na temperatura e na potência de excitação do laser, as transições mais intensas no GaAsSb/InP e no AlGaAsSb/InP [13] não dopados foram identificadas como uma transição do tipo DAP (Donor-Acceptor-Pair) [14] associada à flutuações de potencial eletrostático, seguindo o modelo QDAP (Quasi Donor Acceptor Pair) [15], sem a identificação da impureza doadora. A transição QDAP também é observada em espectros de fotoluminescência da liga AlGaAsSb dopada com Te [16], a partir de amostras crescidas por MBE em condição de rede casada com o substrato do InP. Em materiais dopados e compensados, a distribuição aleatória na concentração de doadores e aceitadores [17] também faz surgir um potencial eletrostático com flutuação

* gustavon@onda.com.br

Tabela A – Descrição das características estruturais das amostras.

Amostra	Tipo de estrutura	Número de períodos	Espessura nominal (nm)			Concentração de portadores ($\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)
			AlGaAsSb	AlAsSb	total	
17Q29	não dopada	6,5	111,5	130,8	1565	-----
17Q36	dop. - liga digital	6,5	108,3	127,1	1521	3,0/1,8
17Q44	dop. - homogênea	6,5	108,3	127,1	1521	3,0/1,8
17Q45	dop. - δ - doping	6,5	108,3	127,1	1521	3,0/1,8
66Q24	dop. - homogênea	20,5	107,0	126,0	4767	5,0/3,0

ao longo do material. As bandas de condução e valência são portanto distorcidas pelo potencial aleatório e o comportamento das transições em espectros de fotoluminescência pode ser explicado pelo modelo QDAP. As flutuações de potencial associadas à inhomogeneidades composicionais e/ou impurezas doadoras e aceitadoras podem interferir nas propriedades de transporte e ópticas das camadas de ligas empregadas na preparação de espelhos de Bragg. O processo de crescimento de espelhos de Bragg é complexo envolvendo a preparação de um número muito grande de camadas das ligas ternárias e quaternárias (20 a 30) necessárias para a obtenção da refletividade requerida. O ajuste das pressões relativas dos elementos V, de modo a proporcionar a condição de casamento do parâmetro de rede com o substrato, no caso o InP, não é trivial, dada às suas altas pressões na câmara de crescimento, em comparação às pressões dos elementos III. Portanto, o estudo das propriedades estruturais e sua interferência nas propriedades ópticas em espelhos de Bragg dopados e não dopados é essencial para o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de VCSELs na região de 1,55 μm .

Neste trabalho fazemos um estudo das propriedades estruturais e ópticas de espelhos de Bragg do sistema AlGaAsSb/AlAsSb não dopado e dopado com Te empregando as técnicas de SIMS, refletividade por FTIR e fotoluminescência. Comparamos os resultados obtidos dos espelhos em função dos parâmetros estruturais e sua influência na refletividade.

2. DETALHES EXPERIMENTAIS

Foram utilizadas amostras de espelho de Bragg do sistema AlGaAsSb/AlAsSb com 6,5 períodos, sendo uma não dopada e as outras dopadas com Te, com diferentes intervenções na interface e uma amostra do mesmo sistema dopada com Te com 20,5 períodos. Todas as amostras foram preparadas utilizando a técnica de crescimento MBE (Molecular Beam Epitaxy), e apresentam o parâmetro de rede nominalmente em condição de casamento com substratos de InP (100). As concentrações de portadores nas amostras dopadas com Te são da ordem de $3\text{-}5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, com valores obtidos através de medidas de efeito Hall a 300 K em amostras volumétricas preparadas em similares condições (mesma temperatura da célula de Te). A composição das ligas, a concentração de Te nas amostras e as características estruturais dos espelhos de

Bragg utilizadas neste trabalho, são apresentados na Tabela A. Medidas de absorção em uma amostra volumétrica com concentração de portadores com valores próximos aos encontrados nos espelhos de Bragg com 6,5 períodos são também apresentadas para efeito de comparação.

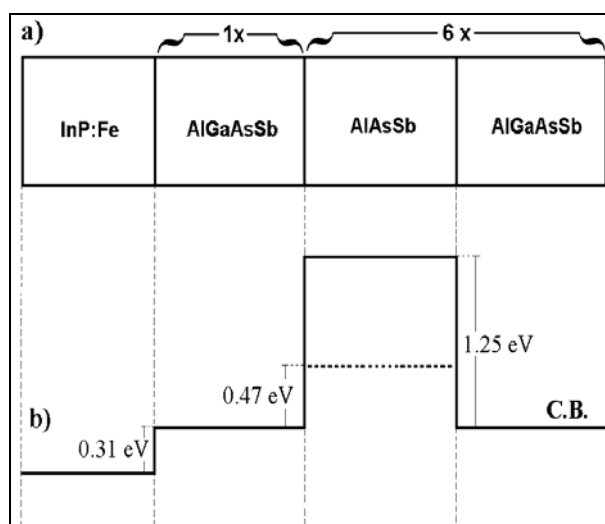


Figura 1 - a) Diagrama da estrutura dos espelhos de Bragg sobre o substrato de InP, com a indicação dos 6,5 pares de camadas alternadas das ligas AlGaAsSb/AlAsSb. b) Diagrama de estrutura de banda considerando o espelho não dopado.

Na Figura 1a) apresentamos o diagrama da estrutura dos espelhos de Bragg sobre o substrato de InP, com a indicação dos 6,5 pares de camadas alternadas das ligas AlGaAsSb/AlAsSb que compõem o sistema. O diagrama de estrutura de banda considerando o espelho não dopado é apresentado na 1b), com a representação da banda de condução relacionada ao vale Γ (linha cheia) e ao vale X (linha pontilhada). Este diagrama leva em conta o alinhamento (“off-set”) entre a estrutura de banda dos materiais $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}_{0,52}\text{Sb}_{0,48}$, $\text{AlAs}_{0,56}\text{Sb}_{0,44}$ e InP, em condição de rede casada com o InP [6].

O perfil da concentração de Te nas amostras “bulk” e a composição de amostras dos espelhos de Bragg foram obtidos utilizando a técnica SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy).

As medidas de PL foram obtidas a temperatura de 300 K, com a excitação feita através de um laser de Argônio utili-

zando a linha de emissão 514,5 nm, com potência de excitação de 532 W/cm². O controle da temperatura sobre a amostra é obtido através de um sistema de ciclo fechado de He, da Janis. A intensidade de PL foi monitorada com um espectrômetro de 0,5 m da Jarrel-Ash e um fotodetector de InGaAs refrigerado com elemento termoeletrônico, utilizando a técnica padrão de amplificação com lock-in.

A refletividade foi medida a 300K por espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier- FTIR (Fourier Transform Infrared) na configuração VW. Esta configuração permite uma medida absoluta da refletividade e a obtenção da forma real do espectro de refletividade com valores quantitativos com 0,25% de acuracidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os perfis de concentração dos elementos que constituem as camadas das ligas AlGaAsSb e AlAsSb no espelho de Bragg de 6,5 período, são apresentados na Figura 2a) para a amostra com dopagem homogênea, Figura 2b) para a amostra com δ -doping e Figura 2c) para a amostra com liga digital. Os resultados para o perfil de concentração dos elementos obtidos para o espelho de Bragg dopado homogêneo com Te de 20,5 períodos são semelhantes aos obtidos para os espelhos de 6,5 períodos. A concentração relativa entre os elementos As e Sb na amostra de espelho com dopagem homogênea apresenta boa concordância com a concentração nominal, com uma diferença praticamente imperceptível na região da liga quaternária (0,51 e 0,49) e bem pequena na região da liga ternária (0,56 e 0,44). Uma maior variação da concentração relativa destes elementos é encontrada na amostra com a liga digital evidenciando a possível presença de tensões. Várias linhas de deslocamentos são observadas nesta amostra o que pode resultar de relaxação devido às tensões. Resultados comparativos de fotoluminescência a baixa temperatura, entretanto, não caracterizam grandes diferenças quanto às concentrações dos elementos das ligas encontrando-se o mesmo valor para as energias de transições radiativas entre os espelhos não dopado (livres de deslocamentos) e dopado com liga digital [17].

A concentração de Te nas amostras de espelho de Bragg apresenta um perfil com flutuação periódica na direção de crescimento. Este comportamento do perfil de concentração do Te nos espelhos de Bragg não foi observado em amostras de AlGaAsSb e AlAsSb “bulk” dopadas com Te [18]. A flutuação na incorporação de Te na região das camadas de AlGaAsSb nos espelhos é um comportamento não previsto, e pode estar associado à dinâmica do processo de crescimento. A temperatura da célula de Te é relativamente baixa (~185 °C) em relação à de outras células como as de Al (~1100 °C). O processo de abertura e fechamento dos obturadores das células de Al pode interferir no funcionamento da célula de Te, provocando a correção automática de sua temperatura, o que por sua vez interfere no fluxo de Te durante o processo de deposição das camadas e consequentemente altera o perfil de concentração do Te incorporado no espelho de Bragg. Este padrão também está presente no per-

fil da concentração de Te na amostra de 20,5 períodos preparada em outra série de crescimento [18].

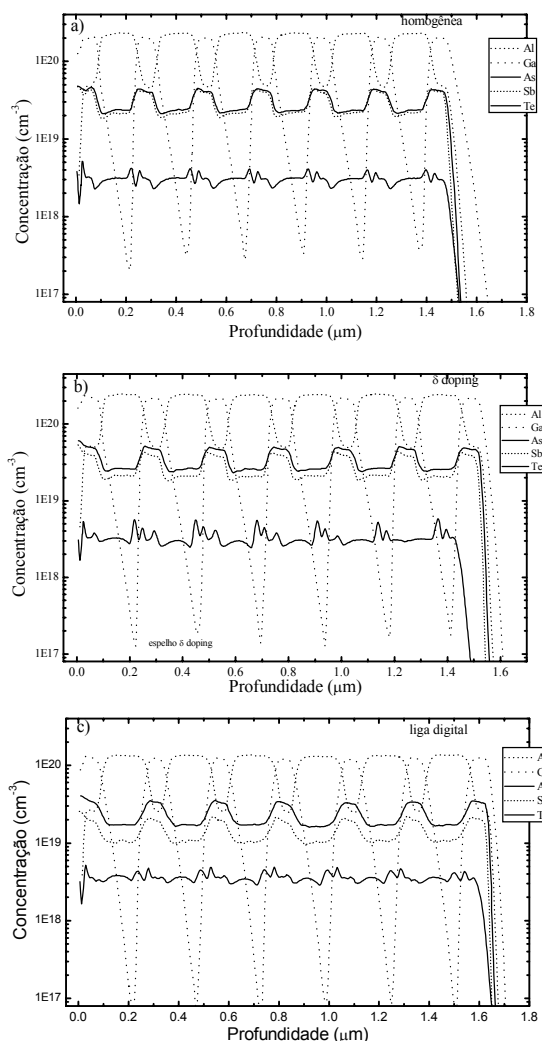


Figura 2 - Medidas de SIMS das amostras de espelho de Bragg com dopagem homogênea a); com δ -doping b); com liga digital c).

Os valores mínimos e máximos da concentração de Te na liga quaternária são maiores nos espelhos com “ δ -doping” e com liga digital, nesta ordem. Em caráter meramente especulativo, supomos que o aumento dos valores dos máximos e dos mínimos na concentração de Te na região da liga quaternária possa estar relacionado à maior presença de As nos sítios do elemento V na rede, nos espelhos com “ δ -doping” e liga digital. O perfil SIMS da amostra com “ δ -doping” não evidenciou um aumento da concentração de Te na região a 40Å da interface ternário/quaternário, como poderia se esperar da interrupção de crescimento na liga ternária. Isto pode estar associado à difusão do Te para regiões próximas à “ δ -doping” levando a um nível de concentração para valores similares aos encontrados em outras regiões mais distantes. Para permitir uma análise mais aprofundada, entretanto são necessários estudos para verificar a dinâmica de incorporação do Te em relação aos fluxos do elemento V nesta liga.

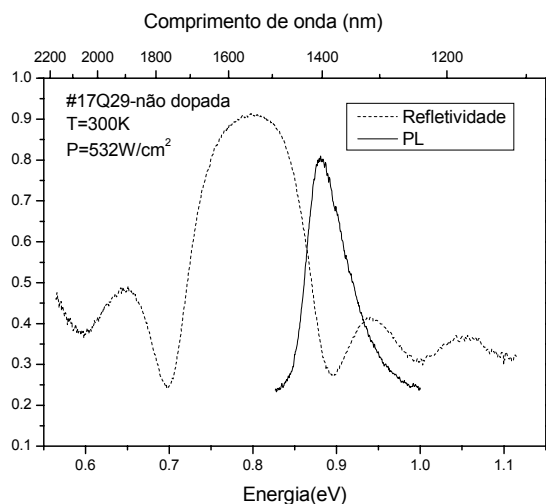


Figura 3 - Espectro de refletividade e PL do espelho não dopado (17Q29) a 300 K.

Na figura 3 apresentamos os espectros de refletividade e de fotoluminescência do espelho não dopado de 6,5 períodos. Dados referentes aos parâmetros dos espectros de refletividade e fotoluminescência podem ser vistos na Tabela B.

Tabela B - Características ópticas das amostras.

Amostra	Refletividade		Fotoluminescência	
	$\lambda_c(\mu\text{m})$	$\Delta\lambda(\mu\text{m})$	$E_{\text{picoPL}}(\text{eV})$	FWHM (eV)
17Q29	1.55	0.394	0.881	0.052
17Q44	1.46	0.367	0.876	0.129
17Q45	1.45	0.364	0.873	0.114
17Q36	1.49	0.370	0.929	0.070
66Q24	1.51	0.190	0.970	0.087

Nas Figuras 4, 5, 6 e 7 apresentamos os espectros de refletividade e de fotoluminescência dos espelhos com dopagem homogênea, “ δ -doping” e liga digital de 6,5 períodos e 20,5 períodos respectivamente, sobrepostos ao espectro de absorção de uma amostra “bulk” com dopagem equivalente. Dados referentes aos parâmetros dos espectros de refletividade e fotoluminescência podem ser vistos na Tabela B. A comparação entre as refletividades e a absorção permite avaliar a diferença de amplitude nas oscilações dos espectros de refletividade, na região de energia anterior e posterior aos picos de maior refletividade. Nas regiões com menor energia, a menor absorção permite que se obtenha maior refletividade. Nas regiões com maior energia, as oscilações na refletividade decrescem em amplitude, devido à maior absorção pelo material quaternário na região acima do “gap”.

As intervenções nas interfaces e a dopagem nos espelhos fazem decrescer a refletividade na seguinte ordem: espelho não dopado, com dopagem homogênea e com “ δ -doping”

(com mesmo valor de refletividade) e espelho com liga digital.

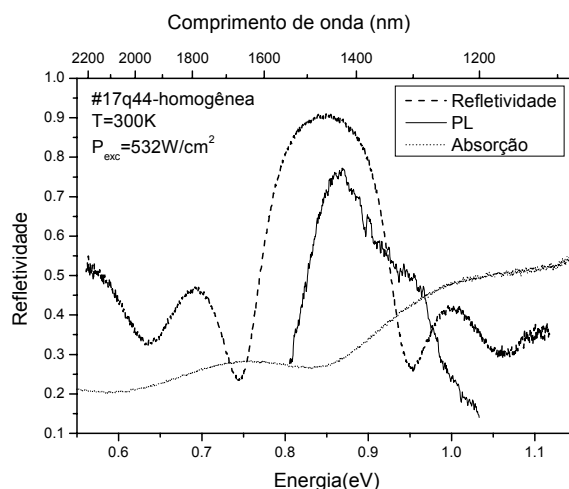


Figura 4 - Espectro de refletividade e PL do espelho com dopagem homogênea (17Q44) a 300 K, e o espectro de absorção da amostra “bulk” da liga AlGaAsSb com dopagem equivalente (76N39).

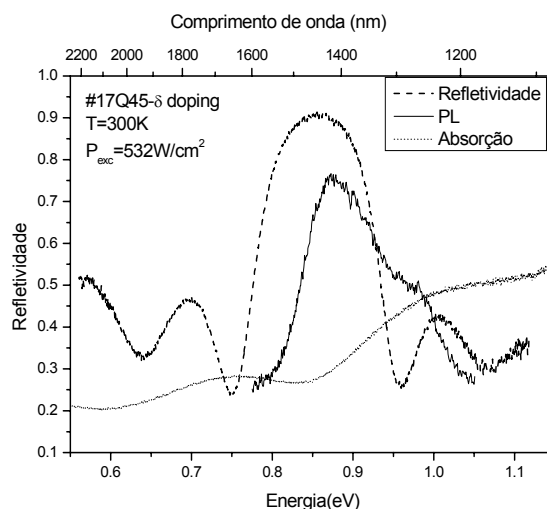


Figura 5 - Espectro de refletividade e PL do espelho com δ -doping (17Q45) a 300 K, e o espectro de absorção da amostra “bulk” da liga AlGaAsSb com dopagem equivalente (76N39).

A superposição do espectro de fotoluminescência com a região da “stop-band” do espectro de refletividade ocorre para a amostra com dopagem homogênea (Figura 4) e com “ δ -doping” (Figura 5). Isto se deve a uma demasiada redução da espessura das camadas componentes dos espelhos nas amostras dopadas concebida para contrabalançar os efeitos da dopagem. A redução nas espessuras tem o efeito de deslocar a região da “stop-band” para menores comprimentos de onda (maiores energias) em comparação ao posicionamento desta na amostra não dopada. Esta superposição é prejudicial ao funcionamento desejado do espelho de Bragg

em termos de seu emprego na fabricação de VCSELs. No espelho de Bragg não dopado e no espelho com liga digital obteve-se uma superposição menor. Na liga digital, isto se deve a extensão da interface da liga digital, que é de 300 Å, com 150 Å na camada do quaternário (alto índice de refração) e 150 Å na camada do ternário (baixo índice de refração). Assim a espessura efetiva das camadas neste espelho é inferior às existentes nos outros espelhos dopados. A estrutura com liga digital parece contribuir também para uma redução na largura de linha a meia altura – FWHM (Full Width Half Maximum) por um mecanismo descrito de modo mais detalhado por Toginho Filho e colaboradores [16], em trabalho recente. No espelho de Bragg com 20,5 períodos e dopagem um pouco superior (ver Tabela A) conseguiu-se obter um “design” um pouco mais adequado com o espectro de fotoluminescência fora da região da “stop-band”. Este efeito é facilitado pelo estreitamento da “stop-band” com o aumento do número de períodos.

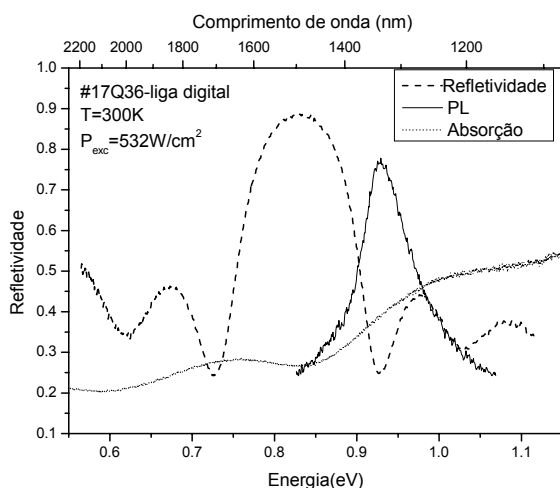


Figura 6 - Espectro de refletividade e PL do espelho com liga digital (17Q36) a 300 K, e o espectro de absorção da amostra “bulk” da liga AlGaAsSb com dopagem equivalente (76N39).

Como mostrado em outros trabalhos recentes [19,20] a estrutura de liga digital em gradiente é a que permite uma maior redução da resistência elétrica em série. A refletividade neste espelho, a menor entre as estruturas preparadas (ver Tabela B) pode ser aperfeiçoada com um estudo mais sistemático para determinação das espessuras dos poços e barreiras e sua extensão dentro das camadas de liga ternária e quaternária. A queda na refletividade poderia ser compensada também com um número maior de períodos. É importante salientar que estes resultados foram obtidos com condições de crescimento não totalmente otimizadas, principalmente para o espelho com liga digital, devido à flutuação na concentração de Te detectada por SIMS e uma concentração excessiva de As. Este excesso de As pode ter levado ao surgimento de tensão mecânica entre o substrato e as camadas de AlGaAsSb/alAsSb, ou mesmo entre as camadas, contribuindo ou sendo responsável para o decréscimo da refletividade. Estudos de simulação visando a otimização destes parâmetros e dos efeitos da dopagem estão em desenvolvi-

mento e mostram que a refletividade pode ser melhorada com espessuras mais adequadas na região da liga digital [21].

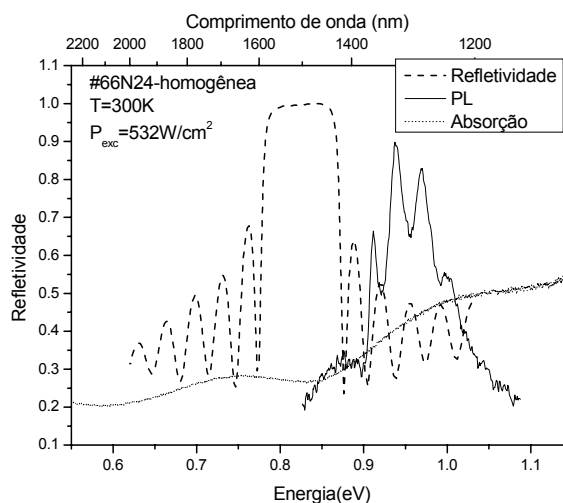


Figura 7 - Espectro de refletividade e PL do espelho com dopagem homogênea (66N24) a 300 K, e o espectro de absorção da amostra “bulk” da liga AlGaAsSb com dopagem aproximada (76N39).

Em resumo, estruturas de espelhos de Bragg preparadas com materiais da família do antimônio são uma boa opção para a tecnologia de preparação de lasers verticais com emissão pela superfície - VCSELs. Estudos mais sistemáticos para o aperfeiçoamento do “design” de sua preparação devem entretanto ser desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

1. LAMBERT, B.; TOUDIC, Y.; ROUILLARD, Y.; BAUDET, M.; GUENAI, B.; DEVEAUD, B.; VALIENTE, I.; SIMON, J.C., *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 690.
2. TOGINHO FILHO, D.O.; DIAS, I.F.L.; DUARTE, J.L.; LOURENÇO, S.A.; POÇAS, L.C.; LAURETO, E.; HARMAND, J.C., *Superlattices Microstruct.* 31 (2002) 277.
3. GENTY, F.; ALMUNEAU, G.; CHUSSEAU, L.; WILK, A.; GAILLARD, S.; BOISSIER, G.; GRECH, P.; JACQUET, J. *J. Cryst. Growth* 201/202 (1999) 1024.
4. DIAS, I.F.L.; NABET, B.; KOHL, A.; HARMAND, J.C.; *Electron. Lett.* 33 (1997) 716.
5. DIAS, I.F.L.; NABET, B.; KOHL, A.; BENCHIMOL, J.L.; HARMAND, J.C., *IEEE Photon. Technol. Lett.* 10 (1998) 763.
6. ALMUNEAU, G.; HALL, E.; MUKAIHARA, T.; NAKAGAWA, S.; LUO, C.; CLARKE, D.R.; COLDREN, L.A., *IEEE Photonics Technology Letters* 12 (2000) 1322.
7. KRIEGER, J.B.; NIGHTINGALE, M., *Phys. Rev. B* 4 (1971) 1266.
8. BURSTEIN, E., *Phys. Rev.* 93 (1954) 632.
9. ABRAM, R.A.; REES, G.J.; WILSON, B.L.H., *Adv. Phys.* 27 (1978) 799.
10. BERGGREM, K.F.; SERNELIUS, B.E., *Phys. Rev. B* 24 (1981) 1971.

11. MERKEL, K.G.; BRIGHT, V.M.; MARCINIAK, M.A.; CERNY, C.L.A.; MANASREH, M.O., *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 2442.
12. DUTTA, P.S.; BHAT, H.L.; KUMAR, V., *J. Appl. Phys.* 81 (1997) 5821.
13. 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.* 97 (2005) 123702-1.
14. YU, P.W.; STUTZ, C.E.; MANASREH, M.O.; KASP, R.; CAPANO, M.A., *J. Appl. Phys.* 76 (1994) 504.
15. CHAMBERLIN, D.R.; YI, S.S.; ISAACSON, D.; GIROLAMI, G.; MOLL, N., *Appl. Phys. Lett.* 83 (2003) 2375.
16. TOGINHO FILHO, D.O.; DIAS, I.F.L.; DUARTE, J.L.; LAURETO, E.; HARMAND, J.C., *Braz. J. Phys.* 35 (2005) 999.
17. SWAMINATHAN, V.; DONELLY, V.M.; LONG, J., *J. Appl. Phys.* 58 (1985) 4565.
18. TOGINHO FILHO, D.O., Características Elétricas e Ópticas de Espelhos de Bragg do sistema AlGaAsSb/AlAsSb sobre InP. Tese de Doutorado (2006). Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR).
19. WANG, C.S.; KODA, R.; HUNTINGTON, A.S.; GOSSARD, A.C.; COLDREN, L.A., *J. Crystal Growth*, 277 (2005) 13.
20. PICKRELL, G.W.; LOUDERBACK, D.A.; FISH, M.A.; HIND, J.J.; LIN, H.C.; SIMPSON, M.C.; GUILFOYLE, P.S.; LEAR, K.L., *J. Crystal Growth* 280 (2005) 54.
21. NICOLODELLI, G., Comunicação interna – GOO – DF/UEL – 2006.