ESTIMATIVA DO "GAP" DE ENERGIA EM LIGAS TERNÁRIAS E QUATERNÁRIAS DA FAMÍLIA DO ANTIMÔNIO

D.O. Toginho Filho^{*}; G. Nicolodelli; I.F.L. Dias; J.L. Duarte; E. Laureto; J.C.S. Pantoja UEL, Departamento de Física, Laboratório de Óptica e Optoeletrônica, C.P. 6001, 86051-970, Londrina, PR

Recebido: 21 de outubro, 2007; Revisado: 11 de dezembro, 2007

Palavras-chave: semicondutores, quaternário, "gap", "bowing".

RESUMO

Neste trabalho é feita a revisão de alguns métodos de interpolação para a obtenção do "gap" de energia em ligas da família do antimônio (GaAsSb, AlAsSb e AlGaAsSb), utilizadas na fabricação de VCSEL. Sugerimos uma expressão de interpolação para o "gap" da liga GaAsSb que se ajusta melhor aos dados experimentais disponíveis na literatura, tanto a baixas temperaturas quanto à temperatura ambiente. Avaliamos dois métodos de interpolação para a liga quaternária, e verificamos que a aplicação dos resultados obtidos para o GaAsSb em um dos métodos (método II) leva ao melhor ajuste dos valores do "gap" de energia para a liga AlGaAsSb. Os termos de "bowing" necessários aos ajustes parecem mostrar uma dependência com a temperatura.

ABSTRACT

In this work we present a review of some interpolation methods used to determine the band gap of alloys of the antimony family (GaAsSb, AlAsSb and AlGaAsSb), which are used to fabricate VCSEL. We suggest an interpolation expression for the band gap of the GaAsSb alloy that has the best fit to the experimental data, available in the literature, obtained at low temperature as well as at room temperature. We have compared two interpolation methods and we have verified that the results obtained for the GaAsSb through one of the methods (method II) lead to a better fit of the band gap values for the AlGaAsSb alloy. The bowing terms necessary to the fit indicate a dependence on temperature.

1. INTRODUÇÃO

Materiais semicondutores da família do antimônio (AlGa-AsSb) com parâmetro de rede casado com InP têm sido utilizados em heteroestruturas de dispositivos optoeletrônicos na região de 1,0 m⁻¹ a 2,0 m⁻¹[1]. Contudo, existe ainda uma relativa falta de conhecimento sobre algumas propriedades destes materiais, tais como parâmetro de rede, índice de refração, "gap" de energia, constante dielétrica, entre outros, necessários para a fabricação de dispositivos [1-5]. Uma alternativa para obtenção dessa propriedade é o método de interpolação, conhecido pela praticidade em estimar alguns dos parâmetros físicos de compostos e ligas.

Para as ligas de materiais semicondutores ternários podemos combinar elementos de duas maneiras: a) dois elementos III e um elemento V, ou b) um elemento III e dois elementos V. Exemplos destas duas formas são as ligas AlGaAs e Ga-AsSb, respectivamente. No caso de materiais quaternários, existem três maneiras de se formar uma liga do tipo ABCD: a) a partir de dois elementos III (A e B) e dois elementos V (C e D); b) a partir de três elementos III (A, B e C) e um elemento V (D); c) a partir de um elemento III (A) e três elementos V (B,C e D). Exemplos destas 3 formas são as ligas AlGaAsSb, AlGaInAs e InPAsSb, respectivamente. Nosso interesse, são os materiais da família do antimônio, empregados na fabricação de espelhos de Bragg como as ligas AlAsSb e AlGaAsSb preparados sobre substrato de InP.



Fig. 1 – Representação da energia de "gap" em semicondutores do tipo III-V em função do parâmetro de rede.

Na Figura 1 mostramos uma representação gráfica do "gap" de energia em função do parâmetro de rede para vários compostos binários. Verifica-se a condição privilegiada do InP como substrato dos materiais semicondutores de nosso interesse.

^{*} darit@uel.br

Neste trabalho é feita a revisão de métodos de interpolação [2-4] para a obtenção do parâmetro de rede e do "gap" em ligas da família do antimônio (GaAsSb, AlAsSb e AlGa-AsSb). Sugerimos uma expressão de interpolação para o "gap" da liga GaAsSb que se ajusta melhor aos dados experimentais disponíveis na literatura, tanto a baixas temperaturas quanto à temperatura ambiente. Avaliamos dois métodos de interpolação para a liga quaternária, e verificamos que a aplicação dos resultados obtidos para o GaAsSb em um dos métodos (método II), leva ao melhor ajuste dos valores do "gap" de energia para a liga AlGaAsSb.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Diversos parâmetros físicos de ligas semicondutoras podem ser obtidos por meio da interpolação linear simples, conhecida como lei de Vergard. Nesta aproximação os parâmetros dos materiais ternários e quaternários variam linearmente com a composição dos parâmetros dos compostos binários constituintes.

A expressão de um parâmetro T_{ij} de uma liga ternária do tipo $A_x B_{1-x} C$ (ou $A C_y D_{1-y}$) obtido através da interpolação linear simples é dada por:

$$T_{ij} = x.B_i + (1-x).B_j$$
 (1)

Sendo T_{ij} o parâmetro relacionado ao material ternário formado, B_i o parâmetro do material binário AC, B_j o parâmetro do material binário BC (ou AD) e x a composição relativa do elemento A (ou y a composição relativa do elemento C). A interpolação linear apresenta resultados muito bons na determinação alguns parâmetros físicos como a constante de

rede, a massa efetiva ou a constante dielétrica, entre outros

[4,6]. Para alguns parâmetros como o "gap" de energia é necessário considerar correções baseadas em medidas experimentais. Estas correções introduzem termos quadráticos denominados termos de "bowing", que dependem da composição relativa dos materiais [7-9]. Considerando estas correções, a expressão (1) é substituída pela expressão:

$$T_{ii}(x) = x \cdot B_i + (1 - x) \cdot B_i - C_{ii} \cdot x \cdot (1 - x)$$
(2)

Sendo C_{ij} o termo de "bowing" característico da liga ternária.

Parâmetros de um material quaternário Q(x,y), podem ser descritos em termos dos materiais binários e ternários que os compõem [2,3,12]. Este parâmetro Q(x,y) pode ser representado por uma superfície no plano, formada com os eixos x e y, sendo $0 \le x \le 1$, e $0 \le y \le 1$. O diagrama que descreve esta superfície para um composto $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ é mostrado na Figura 1, com os parâmetros dos materiais binários representados nos vértices e os parâmetros das ligas ternárias nos contornos da superfície do quadrado.

Entre os vários métodos utilizados para a interpolação de parâmetros em ligas quaternárias, temos o método proposto por Moon e colaboradores [3], que descreve o composto em termos de seus componentes binários. Este método pode ser utilizado para descrever o parâmetro de rede, constante dielétrica, índice de refração, entre outros. Considerando a notação apresentada na Figura 1, o parâmetro da liga quaternária $A_x B_{1-x} C_y D_{1-y}$ pode ser descrito pela expressão:

$$Q(x, y) = B_{BD} + (B_{AD} - B_{BD}).x + (B_{BC} - B_{BD}).y + (B_{BD} - B_{AD} + B_{AC} - B_{BC}).x.y$$
(3)

Sendo os termos B_{ij} os parâmetros das materiais binários que constituem a liga quaternária, x a composição relativa do elemento A e y a composição relativa do elemento C.

A interpolação linear para o "gap" de energia não apresenta boa concordância com os valores experimentais. Para a determinação dos parâmetros de ligas quaternárias, outros dois métodos (método I e II) são sugeridos por Glisson e colaboradores [2]. A liga quaternária composta por dois elementos do tipo III e dois elementos do tipo V pode ser escrita na forma $A_{1-x}B_xC_{1-y}D_y$. No entanto, utilizaremos a descrição da liga com a notação $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$, mais usual na literatura, obtida com a inversão $x \rightarrow (1-x)$ e $y \rightarrow (1-y)$.

Assim, o parâmetro da liga quaternária é descrito pela expressão (método I):

$$Q(x,y) = \frac{1}{x(1-x)+y(1-y)} \{ x(1-x)[yT_{ABG}(x)+(1-y)T_{ABG}(x)] + y(1-y)[xT_{ACG}(y)+(1-x)T_{BCG}(y)] \}$$
(4)

Sendo T_{ABC} , T_{ABD} , T_{ACD} , e T_{BCD} , os parâmetros característicos das ligas ternárias que compõem a liga quaternária, de acordo com notação indicada na Figura 1 e descrita pela expressão (2).

Pelo método II, o parâmetro é obtido pela expressão:

$$Q(x, y) = x T_{ACD}(y) + (1 - x) T_{BCD}(y) - \Delta(x, y)$$
(5)

sendo:
$$\frac{\Delta(x,y) = x.(l-x).[y.C_{ABC} + (l-y)C_{ABD}]}{+y.(l-y).[x.C_{ACD} + (l-x)C_{BCD}]}$$

onde T_{ACD} e T_{BCD} são os parâmetros das ligas ternárias; e C_{ABC} , C_{ABD} , C_{ACD} , C_{BCD} os valores dos termos de "bowing" característicos destas ligas ternárias. No método II os parâmetros das ligas ternárias são descritos pela expressão (1), conforme a notação indicada na Figura 1.

Cada um dos dois métodos pode definir uma superfície associada ao parâmetro da liga quaternária, com os vértices dados pelos compostos binários e os contornos pelas ligas ternárias. Uma diferença muito importante entre os dois métodos é a maneira como os termos de "bowing" são considerados no cálculo. No método I, estes termos são considerados nas expressões dos ternários, enquanto que no método II os termos de "bowing" são considerados junto às variáveis *x* e *y*. Comparando os dois métodos, observamos que no centro da superfície são obtidos valores diferentes para o parâmetro Q(x,y), ou seja, para valores de x = 0,5 e y = 0,5 temse: Método I

$$Q_{I}(x, y) = \frac{1}{16} (C_{ABC} + C_{ABD} + C_{ACD} + C_{BCD})$$

Método II

$$Q_{II}(x, y) = \frac{1}{8}(C_{ABC} + C_{ABD} + C_{ACD} + C_{BCD})$$

Assim, as superfícies definidas a partir dos binários nos vértices da figura geométrica até o centro (x = 0,5 e y = 0,5) são superfícies distintas.

Em relação à dependência térmica do termo de "bowing", alguns autores [10] afirmam que estes termos não mostram dependência com a temperatura, já outros [11,22] argumentam que os termos de "bowing" podem, em princípio, depender dela. Não existem, entretanto dados experimentais sistemáticos que permitam aprofundar na questão [11,22].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo dos valores da constante de rede *a*, de $E_g(x)$, e E_g de (*y*) em ligas ternárias, ou ainda $E_g(x,y)$ para ligas quaternárias, podem ser utilizados os parâmetros dos binários encontrados na literatura. Os valores dos parâmetros dos compostos dos binários que compõem a liga quaternária AlGaAsSb, à temperatura ambiente, são apresentados na Tabela 1 [9].

Tabela 1 – Parâmetro de rede *a*, "gap" de energia nos vales Γ , X, L e a energia da interação spin-órbita)₀ dos compostos binários que compõem a liga AlGaAsSb e do InP, a 300 K [9].

	a (Å)	$E_g^{\Gamma}(\mathrm{eV})$	$E_g^{\mathbf{X}}(\mathbf{eV})$	$E_g^{\mathbf{L}}(\mathbf{eV})$	$\Delta_0(eV)$
AlAs	5,6611	2,95	2,16	2,36	0,28
AlSb	6,1355	2,30	1,61	2,21	0,72
GaAs	5,6533	1,424	1,91	1,73	0,34
GaSb	6,0959	0,725	1,05	0,76	0,74
InP	5,8688	1,35	2,21	2,05	0,11

Na Tabela 2 são apresentados os valores dos termos de "bowing" da ligas ternárias que compõem a liga quaternária [9].

Os parâmetros do GaAsSb podem ser obtidos com a interpolação linear ou interpolação considerando termos de "bowing", a partir dos valores dos parâmetros dos compostos GaAs e GaSb. A dependência do parâmetro de rede da liga GaA_ySb_{1-y} com a composição pode ser estimada com a interpolação linear apresentada na expressão (1). Utilizando os dado apresentados na Tabela 1, obtém-se o parâmetro de rede da liga GaAs_ySb_{1-y} em Å , a 300 K, de acordo com a expressão:

$$a_{GaAsSh}(y) = 6,0959 - 0,4426.y$$
 (6)

Ao se considerar a condição de parâmetro de rede da liga $GaAs_ySb_{1-y}$ em concordância com o do substrato de InP, se obtém a concentração relativa y = 0,513 para o elemento As. A dependência do "gap" de energia da liga com a composição é obtida aplicando o método de interpolação com termos de "bowing", expressão (2), utilizando os valores apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, obtendo-se:

$$E_g^T(y) = 0.72 + 0.502.y + 1.20.y^2$$
(7)

$$E_{\sigma}^{X}(y) = 1,05 - 0,23.y + 1,09.y^{2}$$
 (8)

$$E_{\sigma}^{L}(y) = 0.76 - 0.12.y + 1.09.y^{2}$$
(9)

Tabela 2 – Termos de "bowing", C, das ligas ternárias III-V que compõem o AlGaAsSb [9].

	CΓ	C _X	CL	C_{Δ}
AlGaAs	0,37	0,245	0,055	0,07
AlGaSb	0,47	0	0,55	0,3
AlAsSb	0	0	0	0
GaAsSb	1,2	1,09	1,09	0,61

Parâmetros da liga ternária AlAsSb podem ser obtidos com a aplicação da interpolação linear ou interpolação com termos de "bowing", utilizando os parâmetros dos compostos binárias AlAs e AlSb. Com os dados apresentados na Tabela 1, o parâmetro de rede da liga AlAs_ySb_{1-y} em unidade de Å, a 300 K é descrito pela expressão:

$$a_{AlAsSb}(y) = 6,1355 - 0,4744.y$$
 (10)

Igualando a expressão (10) ao valor do parâmetro de rede do InP (5,8688 Å), se obtém a concentração relativa de 0,562 para o elemento As, na qual a liga $AlAs_ySb_{1-y}$ apresenta condição de parâmetro de rede casado com o do substrato de InP.

A dependência do "gap" de energia para o AlAsSb nos vales Γ , X e L, com a composição é obtida aplicando o método de interpolação com termos de "bowing", expressão (2), usando os valores apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2:

$$E_{\sigma}^{\Gamma}(y) = 2,3 + 0,65.y \tag{11}$$

$$E_{\sigma}^{X}(y) = 1,61 + 0,55.y$$
(12)

$$E_{\sigma}^{L}(y) = 2,2l + 0,15.y$$
 (13)

As curvas da dependência do "gap" de energia a 300K, com a composição são apresentadas na Figura 2a para a liga Ga-AsSb e 2b para a liga AlAsSb. A liga GaAsSb apresenta "gap" direto, sendo o vale Γ o de menor energia em todo o intervalo de composição. Já a liga AlAsSb apresenta "gap" indireto, com o vale X com a menor energia em todo o intervalo de composição. É importante ressaltar que, embora o AlAsSb tenha sido utilizado na confecção de dispositivos, são poucos os trabalhos sobre suas propriedades.

Na Figura 3a são apresentadas as curvas do "gap" de energia a 300 K, em função da composição, para a liga GaAsSb, de acordo com expressões e dados experimentais disponíveis na literatura [4,15-17]. A curva obtida a partir da expressão proposta por Klem e colaboradores [16] é a que melhor ajusta os pontos experimentais. Na Figura 3b são apresentados pontos experimentais com os valores da energia de "gap" até 280 K, obtidos por de medidas de absorção [17]. Também apresentamos os dados experimentais obtidos a partir de nossas medidas de fotoluminescência (PL) [23]. Para ajustar estes pontos experimentais, apresentamos nesta mesma figura as curvas que descrevem a dependência do "gap" de energia com a composição de As na liga GaAsSb, a 0 K, 60 K, 180 K, e 300 K. A curva que descreve o "gap" a 0 K é obtida a partir da expressão proposta por Vurgaftman e colaboradores [11] e a 300 K a partir da expressão proposta por Klem e colaboradores [16]. Para ajustar os pontos experimentais em 60 K e 180 K, empregamos curvas com termos de "bowing" obtidos a partir de uma relação linear entre os termos de "bowing" e a temperatura sugeridos por Vurgaftman e colaboradores [11] e Klem e colaboradores [16].



Fig. 2 - Variações das energias de "gap" em função da composição de As, para as ligas GaAs_vSb_{1-v} e AlAs_vSb_{1-v}.

Sugerimos expressões para o "gap" de energia a 0 K e 300 K, que ajustam melhor os dados experimentais. Estas expressões, apresentadas na Tabela 3, foram obtidas ajustando a curva aos dados experimentais, alterando ligeiramente o valor do termo de "bowing" sugeridos por Vurgaftman e colaboradores [11] e por Klem e colaboradores [16], e utilizando valores mais precisos do "gap" de energia para os compostos binários [18].



Fig. 3 – a) Curvas de dependência das energias de "gap" da liga GaAs_ySb_{1-y} a 300 K, em função da composição de As e dados experimentais obtidos por absorção. b) Curvas de dependência das energias de "gap" com a composição de As na liga GaAsSb, em 0 K, 60 K, 180 K, 300 K, sendo as linhas - valores teóricos calculados, os pontos vazados - dados experimentais deste trabalho, e os pontos cheios - dados experimentais da literatura.

Tabela 3 – Expressões sugeridas para o "gap" de energia direto da liga GaAsSb.

Temp. (K)	(GaAs _y Sb _{1-y}) E _g (eV)	(GaAs _{1-y} Sb _y) E _g (eV)	Eg _{GaAs} (eV)	Eg _{GaSb} (eV)	C_{GaAsSb}
0	0,813 - 0,725y+1,40y ²	1,519 - 2,106y+1,40y ²	1.517	0,812	1.43
60	0,804 - 0,706y+1,414y ²	1,519 - 2,106y+1,40y ²	1.512	0,804	1.414
180	0,770 - 0,679y+1,382y ²	1,519 - 2,106y+1,40y ²	1.473	0,770	1.382
300	0,726- 0,654y+1,35y ²	1,424 - 2,058y+1,36y ²	1.423	0,727	1.35

Este estudo sobre GaSb é relevante devido ao maior peso relativo deste componente ternário para o cálculo do "gap" da liga AlGaAsSb, com a liga quaternária com concentração de alumínio relativamente baixa (de 0,08 até 0,12), empregada normalmente na fabricação de espelhos de Bragg.

O parâmetro de rede da liga $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ em função da composição pode ser estimado com a interpolação linear a-

presentada na expressão (3). Aplicando os dados da Tabela 2, o parâmetro de rede (em Å) da liga $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$, é descrito, a 300 K, pela expressão:

$$a_{AIGaAsSb}(x, y) = 6,0959 + 0,0396.x$$

-0,4426.y - 0,0318.x.y (14)

Considerando o parâmetro de rede da liga quaternária igual ao do substrato de InP, obtemos uma relação entre a concentração relativa dos elementos tipo V em função da concentração de elementos tipo III, de acordo com a expressão:

$$y(x) = \frac{0.2271 + 0.0396.x}{0.4426 + 0.0318.x} \qquad 0 \le x \le 1$$
(15)

Os valores de *x* podem variar em todo o intervalo de concentração do elemento Al. Aplicando o valor de x = 0 e x = 1, e rescrevendo a expressão (15) na forma de x(y), se obtém:

$$x(y) = \frac{-0.2271 + 0.4426.y}{0.0396 - 0.0318.y} \quad 0.513 \le y \le 0.562$$
 (16)

Portanto, a condição de casamento do parâmetro de rede entre a liga AlGaAsSb e o substrato de InP só é possível com concentração de As variando no intervalo 0,513 < y < 0,562, enquanto a composição de Al pode variar no intervalo 0 < x < 1.

O "gap" de energia da liga quaternária, a 300 K, pode ser obtida a partir da expressão (4) (método I) e da expressão (5) (método II), usando os parâmetros dos compostos binários apresentados na Tabela 1, e os termos de "bowing" da Tabela 2.

As curvas com a dependência do "gap" de energia do composto quaternário para os vales Γ , X e L, utilizando os métodos I e II, de acordo com as equações (4) e (5) respectivamente, são apresentados na Figura 4. Observa-se que o vale Γ é o de menor energia com a composição de alumínio variando de 0% até pouco acima de 40%. Assim, a liga Al-GaAsSb apresenta "gap" direto nesta região e "gap" indireto para *x* acima de 40%.

Para avaliar os dois métodos apresentamos na Figura 5 valores experimentais para o "gap" de energia direto, obtidos da literatura e de amostras "bulk" (76N39) e dois espelhos de Bragg (17Q29 e 17Q44) [24]. Também apresentamos na Figura 5 as curvas da dependência do "gap" de energia com a composição de Al, obtidas através dos métodos de interpolação I e II. O método I, desenvolvido por Glisson e colaboradores [2], é mencionado como o que apresenta melhor concordância entre os valores calculados teoricamente e os medidos experimentalmente. No entanto, verificamos que na região de baixa concentração de Al, o método I é o que menos concorda com os pontos experimentais. Na curva referente ao método II, com linha tracejada, utilizamos os dados das ligas binárias e ternárias descritos na Tabela 1 e na Tabela 2. Para a obtenção da curva com linha sólida, foram utilizados os mesmos dados da curva anterior, exceto as informações referentes à liga GaAsSb, que foram obtidas da Tabela 3. Assim, vemos que o método II, com o termo de "bowing" sugerido neste trabalho para o GaAsSb, é o que melhor ajusta os pontos experimentais do "gap" direto na liga AlGaAsSb.



Fig. 4 – Energias de "gap" da liga AlGaAsSb em função da concentração de Al, com a concentração de As, y = 0,516, de acordo com o modelo I em a) e com o modelo II em b).



Fig. 5 – Curvas para as energias de "gap" no vale Γ em função da composição de Al, para a liga AlGaAsSb, com o parâmetro de rede casado com o substrato de InP. Os pontos cheios são dados experimentais obtidos nos trabalhos dos autores indicados nas referências de Chiu [13], Klem [14], Blum [19], Harmand [20] e Chusseau [21].

4. CONCLUSÕES

Revisamos e avaliamos diferentes métodos de interpolação encontrados na literatura para o cálculo de diversos parâmetros das ligas GaAsSb, AlAsSb e AlGaAsSb, como o "gap" de energia em função da composição, o parâmetro de rede, entre outros.

Apresentamos uma expressão com termos de "bowing" para o cálculo do "gap" da liga GaAsSb em função da composição que se ajusta melhor aos dados experimentais disponíveis na literatura, tanto em baixa temperatura quanto em temperatura ambiente. As expressões para o "gap" que propomos para o GaAsSb se ajustam melhor aos pontos experimentais quando consideramos a dependência dos termos de "bowing" com a temperatura, embora esta dependência ainda esteja em discussão segundo Vurgaftman e colaboradores [11], Cuevas e colaboradores [22] por falta de dados experimentais. O método II, por Glison e colaboradores, é o que apresenta melhores resultados para o "gap" da liga AlGaAsSb. A aplicação do método II com a expressão por nós sugerida para a liga GaAsSb resulta no melhor ajuste dos pontos experimentais do "gap" direto na liga AlGa-AsSb, com parâmetro de rede em compatibilidade com o InP e baixa concentração de Al.

O uso adequado dos métodos de interpolação permite o cálculo de diversos parâmetros de ligas, necessários ao desenvolvimento do "design" de dispositivos. No caso dos espelhos de Bragg utilizados na fabricação de VCSLEs, estes cáculos permitem a otimização das espessuras das camadas de ¹/₄ de onda.

5. REFERÊNCIAS

- 1. SHIM, K., Solid State Comm. 134 (2005) 437.
- GLISSON, T.H.; HAUSER, J.R.; LITTLEJOHN, M.A.; WILLIAMS, C.K., J. Electron. Mater. 7 (1978) 1.
- MOON, R.L.; ANTYPAS, G.A.; JAMES, L.W., J. Electron. Mater. 3 (1974) 635.
- 4. ADACHI, S., J. Appl. Phys. 61 (1987) 4869.

- OKUYAMA, H.; KISHITA, Y.; ISHIBASHI, A., *Physical Review B* 57 (1998) 2257.
- REASON, M.; WENG, X.; YE, W.; DETTLING, D.; HANSON, S.; OBEIDI, G.; GOLDMAN, R.S., J. Appl. Phys. 97 (2005) 103523.
- 7. VAN VECHTEN, J.A.; BERGSTRESSER, T.K., *Phys. Rev. B* 1 (1970) 3351.
- 8. PHILLIPS, J.C.; VAN VECHTEN, J.A., *Phys. Rev. Lett.* 22 (1969) 705.
- 9. ADACHI, S., J. Appl. Phys. 58 (1985) R1.
- SVENSSON, S.P.; GILL, M.G.; UPPAI, P.N., J. Appl. Phys. 81 (1997) 1422.
- 11. VURGAFTMAN, I.; MEYER, J.R.; RAM-MOHAR, L.R., J. Appl. Phys. 89 (2001) 5815.
- LITTLEJOHN, M.A.; HAUSER, J.R.; GLISSON, T.H., *Appl. Phys. Lett.* 30 (1997) 242.
- 13. CHIU, T.H.; TSANG, W.T.; CHU, S.N.G.; SHAH, J.; DITZENBERGER, J.A.; *Appl. Phys. Lett.* 46 (1985) 408.
- KLEM, J.; HUANG, D.; MORKOÇ, H.; IHM, I.E.; OTSUKA, N., *Appl. Phys. Lett.* 50 (1987) 1364.
- NAHORY, R.E.; POLLACK, M.A.; DEWINTER, J.C.; WILLIAMS, K.M., J. Appl. Phys. 48 (1977) 1607.
- KLEM, J.F.; HUANG, D.; MORKOC, H.; IHM, Y.E.; OTSUKA, N., Proc. SPIE 877 (1988) 28.
- 17. LUKIC-ZRNIC, R.; GORMAN, B.P.; COTTIER, R.J.; GOLDING, T.D.; LITTLER, C.L.; NORMAN, A.G., *J. Appl. Phys.* 92 (2002) 6939.
- Ioof Physico-Technical Institute. Disponível em: http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html. Acesso em 02 de setembro de 2005.
- BLUM, O.; FRITZ, I.J.; DAWSON, L.R.; DRUMMOND, T.J., Electron. Lett. 31 (1995) 1247.
- HARMAND, J.C.; JEANNÉS, F.; LE ROUX, G.; JUHEL, M., Electron. Lett. 31 (1995) 1689.
- CHUSSEAU, L.; ALMUNEAU, G.; GENTY, F., Recent Research Developments in Quantum Electronics 1 (1999) 85.
- 22. CUEVAS, J.A.G.; REAFAAT, T.F.; ABEDIN, M.N.; ELSAYED-ALI, H.E., J. Appl. Phys. 102 (2007) 014504.
- 23. 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.
- 24. 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.