CONDUTIVIDADE INDUZIDA POR LUZ EM $Al_XGa_{1-X}As$ - EFEITOS DEVIDO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Marco H. Taquecita [1,2], Luis V.A. Scalvi [1] #, Sidney B. Parreira [1,2]

UNESP - Bauru, Cx. Postal 473, 17033-360 Bauru SP
(1) - Depto. Física - FC
(2) - Depto. Engenharia Elétrica -FET
- e-mail : scalvi@bauru.unesp.br

Palavras-chave : semicondutores, arseneto de gálio e alumínio, fotocondutividade

RESUMO

Existem intervalos de temperatura onde o espectro da fotocondutividade é completamente mascarado pelos níveis profundos, tais como o centro DX que é dominante em $Al_xGa_{1-x}As$. Nós medimos o espectro da fotocondutividade como uma função da temperatura e encontramos que acima de aproximadamente 120K, a ausência da fotocondutividade persistente contribui para um espectro limpo, onde a transição de banda proibida é facilmente avaliada. Nós também medimos a resistência em função da temperatura sob a influência de iluminação constante com luz monocromática de comprimento de onda no intervalo 0,5-1,5 μm, e plotamos a condutância (GxT) devido a esta medida. Abaixo de 70K, o comportamento da curva GxT depende da composição de Al na amostra pois numa amostra com transição direta, luz com energia acima da transição induz um aumento na condutividade para valores acima da temperatura ambiente e valores de energia abaixo da transição não são capazes de evitar a captura por outro nível.

ABSTRACT

There are temperature ranges where photoconductivity spectra are completely masked by deep levels, such as DX centers which is dominant in $Al_xGa_{1-x}As$. We have measured photoconductivity spectra as function of temperature and have found that above approximately 120K, the absence of persistent photoconductivity contributes for a very clean photoconductivity spectrum, and the bandgap transition is easily evaluated. We have also measured resistance as function of temperature under influence of steady illumination of monochromatic light in the range 0.5-1.5 μm, and plot the conductance (GxT). Below 70 K, GxT behavior depends on the aluminum amount in the composition, since in direct bandgap samples, above bandgap light increases conductivity to higher values than at room temperature and below bandgap light is not enough to avoid trapping by another level.

1. INTRODUÇÃO

$Al_xGa_{1-x}As$ é uma liga de grande interesse tecnológico para a fabricação de dispositivos optoeletrônicos[1]. Para a compreensão efetiva da combinação entre propriedades óticas e elétricas deste material deve-se proceder a um abaixamento de temperatura, de modo a se aumentar a resolução da medida experimental, uma vez que na temperatura ambiente a geração térmica de portadores de carga é alta e impossibilita a verificação de possíveis transições entre bandas ("bandgap") ou intra-bandas. No entanto, no caso particular desta liga semicondutora, o abaixamento de temperatura induz um fenômeno de relaxação da rede cristalina, devido a captura de elétrons num defeito[2] conhecido como centro DX. Segundo o modelo mais aceito para explicar esse fenômeno[3] o centro DX é o próprio átomo doador que captura 2 elétrons e se aloja numa posição intersticial. O movimento da posição original, substitucional num sítio de Ga, para a posição intersticial constitui o processo de relaxação da rede. O defeito na posição intersticial terá carga líquida negativa (DX^-) e se estabilizará devido a um forte acoplamento elétron-fonon. O que viabiliza a excitação com luz a baixa temperatura é o que o centro DX é predominante apenas num intervalo de temperaturas e, portanto, quando se varre o espectro da fotocondutividade como uma função da temperatura, pode-se encontrar intervalos mais apropriados para a medida de condutividade induzida por luz, evitando-se, assim, o efeito detrimental do centro DX. Assim, com a escolha da temperatura adequada pode-se obter uma alta precisão na avaliação das transições de níveis de energia em $Al_xGa_{1-x}As$.

Neste trabalho investigamos as variações da condutância sob a influência de iluminação com luz monocromática de intensidade constante em função da temperatura e apresentamos também o espectro da fotocondutividade em diversas temperaturas avaliando o efeito da variação da temperatura e da presença de níveis profundos em $Al_xGa_{1-x}As$ do tipo n.

2. DETALHES EXPERIMENTAIS

As amostras usadas neste trabalho foram crescidas por epitaxia de feixe molecular sobre substrato semi-isolante de

GaAs. A estrutura é depositada de modo a evitar a formação de um gás bidimensional de elétrons na interface[1], pois estamos interessados nas propriedades do próprio volume de $Al_xGa_{1-x}As$. As camadas ativas das amostras utilizadas possuem 2 μm de espessura e composições diferentes: amostra I - aproximadamente 34% de Al e $1x10^{18}$ cm^{-3} de Si como dopante, amostra II - aproximadamente 55% de Al e $5x10^{17}$ cm^{-3} de Si. Para o abaixamento de temperatura utilizou-se um criostato da APD cryogenics com circuito fechado de He, que permitiu o controle de temperatura na faixa de 1-400 K com precisão de 0,1 grau. O isolamento térmico foi obtido com uma bomba de vácuo da Balzers que garante pressão da ordem de 10^{-4} Torr. As medidas elétricas foram realizadas com um eletrômetro Keithley modelo 617 e a amostra foi excitada com luz monocromática obtida de uma fonte de luz de tungstênio-halogeneto alcalino e um monocromador. Esta fonte de luz possui controle de corrente e potência, o que permite controle da intensidade de luz.

3. CONDUTIVIDADE FOTOINDUZIDA EM $Al_XGa_{1-X}As$

A figura 1 mostra condutância em função da temperatura para uma amostra de $Al_xGa_{1-x}As$ de "bandgap" direto (amostra I) no escuro, e sob influência de luz monocromática de diversos comprimentos de onda. Foi mantida a mesma intensidade simplesmente garantindo-se que a corrente na fonte de luz fosse controlada no valor de 9 A. No escuro a condutância diminui conforme a temperatura diminui devido à recombinação elétron-buraco entre a banda de valência e a banda de condução e, principalmente, devido à captura de elétrons pelos centros DX, que é bastante intensa, variando 6 ordens de grandeza de 300 K a 30 K. É bastante conhecido que abaixo de aproximadamente 120K, o átomo doador captura praticamente todos os elétrons da banda de condução tornando-se DX^-, pois um estado d^0 seria bastante instável[3] (d^0- átomo doador neutro, na posição substitucional). Nas curvas com iluminação contínua, é feito abaixamento de temperatura e, então, a luz é incidida com intensidade constante sobre a amostra na subida de temperatura. Em todas as curvas ocorre um ponto de mínimo na condutância entre 100 K e 200 K, cujo valor de temperatura depende da energia da luz incidente. Os valores de temperatura correspondentes a esses valores mínimos de condutância estão no detalhe da figura 1. O maior valor de temperatura corresponde a uma iluminação na amostra com λ=600 nm (≅2,06eV), que conforme será visto, é um valor bastante próximo do "bandgap" desta amostra e, portanto, a iluminação da amostra é um processo muito mais eficiente neste caso. A figura 1 deve ser vista como um processo dinâmico de captura térmica e fotoexcitação que ocorrem simultaneamente. A forma da curva depende da energia dos fótons da luz incidente e, também, da eficiência desta luz em manter elétrons metaestavelmente na banda de condução. É importante mencionar que a intensidade foi mantida constante, pelo controle de corrente que circula na lâmpada de tungstênio-halogeneto alcalino. Para as curvas com λ=900nm e λ=1500nm ocorre uma nova diminuição na condutância para valores menores que aproximadamente 70K, o que não ocorre para as outras curvas, que correspondem a energias maiores. Este fenômeno é diferente do que foi observado para $Al_xGa_{1-x}As$ de "bandgap" indireto[5], onde mesmo para energias maiores que o "bandgap" esse abaixamento na condutância é observado. Este fenômeno está ligado ao estado de massa efetiva do vale X [6,7], que é suficientemente profundo para capturar os elétrons metaestavelmente. Este resultado também pode estar relacionado à existência de um estado de simetria A_1, altamente localizado, que foi reportado anteriormente[8]. Nossos resultados mostram que este nível de captura é mais forte nas amostra de "bandgap" indireto, mas que mesmo em amostras de "bandgap" direto ele existe e participa do processo de recombinação eletrônica, ao contrário do que se pensava anteriormente.

O espectro da fotocondutividade para a amostra II foi obtido para várias temperaturas e algumas dessas medidas estão mostradas na figura 2. A medida feita a 200 K está no detalhe da figura 2, pois se fosse plotada junto com as outras consistiria de uma linha muito próxima do valor mínimo, conforme pode ser visto pelos valores relativos da fotocondutividade (eixo y), o que dificultaria a visualização do pico de condutividade. É importante mencionar que, apesar de contarmos com um sistema automático de

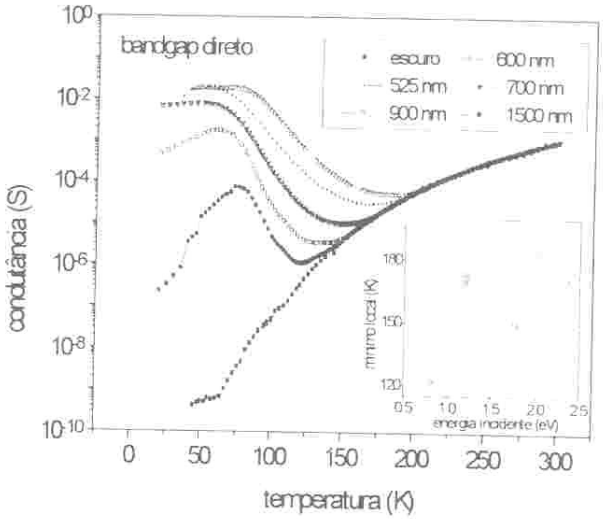

Figura 1 - CondutânciaxTemperatura (amostra I) no escuro e sob luz monocromática. Detalhe - temperatura correspondente ao mínimo de condutância entre 100K e 200K

varredura e aquisição de dados, as curvas mostradas na figura 2 foram feitas manualmente variando-se 5nm a cada 10 segundos (espaçamento entre os pontos coletados, devido ao processo manual), e sentido decrescente do comprimento de onda (crescente de energia), devido a um problema com o motor de passo. No entanto, a qualidade da transição

observada, mostra que a influência desse fator foi pequeno, pois a medida apresenta muito boa resolução. A figura 2 ilustra a influência dos níveis profundos no espectro da fotocondutividade, pois a 40 K, por exemplo, a transição não tem seu final bem definido, pois tanto a excitação ótica como a captura térmica são processos lentos e, assim, o valor da energia onde a transição termina não é visto com clareza na figura 2. O espectro obtido a 80 K é bastante similar ao obtido a 40 K e não foi mostrado na figura 2 pois o intervalo de varredura é um pouco diferente e, também, o valor máximo é metade do valor a 40 K. A figura 2 mostra que a transição de banda proibida é de mais fácil observação para temperaturas superiores à região de domínio do centro DX, ou seja, maiores que ≅120K [9]. O detalhe desta figura comprova isso, pois ainda que a fotoexcitação a 200K não seja um processo tão eficiente (o valor máximo é apenas 1,5 vezes o valor mínimo), a transição é um processo facilmente visualizável, tanto o início como o final. Com as curvas obtidas a diversas temperaturas, foi possível obter o valor médio da transição de banda proibida e com auxílio de uma expressão da literatura[1], estimou-se a composição de alumínio como ≅56%. Nossa intenção agora é obter uma expressão mais exata para transição de banda proibida em função da temperatura, o que será feito tão logo a automação do sistema seja restabelecida.

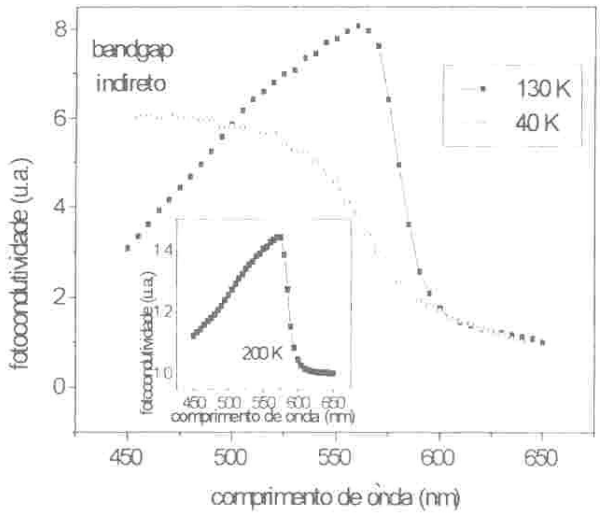

Figura 2 - fotocondutividade para amostra II em 40K e 130K. Detalhe -fotocondutividade a 200K para mesma amostra

Um procedimento similar ao mostrado na figura 2, foi feito para a amostra I e o resultado para algumas temperaturas é mostrado na figura 3. Esta figura também mostra a eficiência de se medir o espectro da fotocondutividade a 130K, pois comparado às demais curvas, é o mais nítido e aquele que apresenta maior distância entre os valores máximo e mínimo. Acima deste valor, essa distância começa a diminuir, conforme é verificado para T=150K. O detalhe da figura 3 ilustra um método simples de se estimar o "bandgap" de energia. Consiste de se supor a condutância como proporcional à absorção ótica, ou seja :

$$G = B\,\alpha \qquad (1)$$

onde G é a condutância e α o coeficiente de absorção ótica. Para amostras de "bandgap" direto, a transição de banda proibida pode ser obtida por [10] :

$$\alpha h\nu = A^{*}(h\nu - E_g)^{1/2} \qquad (2)$$

onde h é a constante de Planck, ν é a freqüência da luz, E_g é a energia da transição e A^{*} é uma constante de proporcionalidade. Combinando (1) e (2) :

$$(G h\nu)^2 = A'(h\nu - E_g) \qquad (3)$$

onde A' é uma constante, combinação de B e A^{*}. Assim um gráfico de $(Gh\nu)^2$ x $h\nu$ pode ser aproximado por uma reta na região de transição, e extrapolada até o ponto onde corta o eixo x, conforme mostra o detalhe da figura 3. Este ponto (y=0) corresponde a $h\nu = E_g$ e portanto à transição de banda proibida. Naturalmente este é um procedimento simplificado, que não leva em consideração o efeito do campo elétrico no diagrama bandas de energia ou na excitação diferencial de portadores. No entanto, deve-se lembrar que este campo elétrico é mantido durante todo o espectro e portanto a única variável experimental é a absorção de de luz cujo comprimento de onda é ajustável. O valor médio da composição de Al, obtido com este procedimento foi de x≅34%. Deve-se mencionar que este cálculo não foi feito para amostra de "bandgap" indireto, pois além dos efeitos do campo elétrico aplicado, na avaliação desta transição deve-se levar em conta os efeitos devido à absorção ou emissão de fonons, e assim é necessário uma expressão um pouco mais complexa que a expressão (3). Uma modelagem que leva em conta estes efeitos deve ser proposta por nós oportunamente.

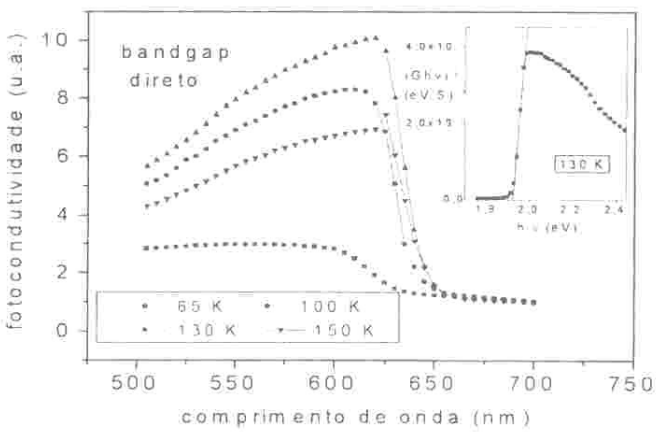

Figura 3 - fotocondutividade para amostra I em diversas temperaturas. Detalhe - avaliação da transição de banda proibida

4. CONCLUSÃO

As curvas de condutância em função da temperatura mostram as regiões de predomínio do centro DX assim como o equilíbrio dinâmico entre fotoexcitação e captura térmica, o que naturalmente depende da energia dos fótons da luz incidente. A excitação ótica é mais eficiente para energias próximas da transição de banda proibida (bandgap), sendo predominante sobre a captura térmica até uma temperatura mais alta que outras energias luminosas. As curvas condutância x T para $Al_xGa_{1-x}As$ de "bandgap" direto, apresentadas aqui, mostram também a existência de outro nível de captura a temperaturas mais baixas.
O espectro da fotocondutividade é medido com muito maior resolução para temperaturas superiores a ≅120K, que é o limite superior da região de predomínio do centro DX. Apresentamos medidas de fotocondutividade tanto para $Al_xGa_{1-x}As$ de "bandgap" direto como indireto e estimamos a composição de Al nas amostras. Nosso interesse é continuar a investigação do efeito da temperatura e obter expressões melhores para a avaliação da influência da variação da temperatura nas transições de banda proibida e captura por defeitos presentes no material

5. AGRADECIMENTOS

As amostras utilizadas neste trabalho forma crescidas na Oregon State University (Estados Unidos). Um dos autores (L.V.A. Scalvi) agradece toda a hospitalidade durante sua estada em Corvallis. Os autores agradecem suporte financeiro da CAPES, CNPq, FAPESP e PRONEX 402/96.

6. BIBLIOGRAFIA

1. S. Adachi, *GaAs, AlAs, $Al_xGa_{1-x}As$: Material Parameters for use in Research and Device Applications*, J. Appl. Phys. **58**, R1 (1985)
2. P.M. Mooney, *Deep Donor Levels (DX Centers) in III-V Semiconductors*, J. Appl. Phys. **67**, R1 (1990)
3. D.J. Chadi e K.J. Chang, *Energetics of DX Center Formation in GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ Alloys*, Phys. Rev. B **44**, 8621 (1989)
4. L.V.A.Scalvi, L. Oliveira, E. Minami e M. Siu Li, *Dipole Relaxation Current in n-type $Al_xGa_{1-x}As$*, Appl. Phys. Lett. **63**, 2658 (1993)
5. L.V.A. Scalvi, L. Oliveira e M. Siu Li, *Light and Thermal Excitation of Depolarization Current in Indirect Bandgap $Al_xGa_{1-x}As$*, Brazilian J. Phys. **26**, 239 (1996)
6. L.Dobaczewski e P. Kaczor, *Photoionization of DX (Te) Centers in $Al_xGa_{1-x}As$: Evidence for a Negative-U Character of the Defect*, Phys. Rev. B **44**, 8621 (1991)
7. P.Séguy, M. Zigone e G. Martinez, *Bound Phonons and DX Centers in GaAs under Hydrostatic Pressure*, Phys. Rev. Lett. **68**, 518 (1992)
8. T.N Theis, P.M. Mooney e B.D. Parker, *Bistability of the DX Center in GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$, and Experimental Tests for Negative U of the DX Level*, J. Electr. Materials **20**, 35 (1991)
9. T.W. Dobson, L.V.A. Scalvi e J. F. Wager, *Transient decay of Persistent Photoconductivity in $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$*, J. Appl. Phys. **68**, 601 (1990)
10. J.I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publications, N. York (1975)