

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO GASOSA E CORRENTE
DE EXCITAÇÃO EM LASERS DE He/N₂/CO₂-CW

Vitor Baranauskas

Faculdade de Engenharia - UNICAMP

Caixa Postal 6061 - 13100 - Campinas - SP

Estudamos experimentalmente a variação da potência de Laser em função do fluxo de He para vários valores de fluxo de CO₂ e N₂. Como pudemos observar, para uma determinada corrente de excitação a potência é praticamente independente do fluxo de He, desde que ele esteja acima de um limiar. A relação entre o CO₂ e o N₂ é mais complexa. Dentro dos parâmetros observados, quanto maior a quantidade de N₂ para uma quantidade fixa de CO₂, maior potência. Entretanto, mesmo mantendo uma relação de N₂/CO₂ alta, mas diminuindo a quantidade de CO₂ a potência cai. São apresentadas as curvas isopotenciais em função do fluxo de CO₂ e N₂, mantendo-se os outros parâmetros fixos. Observa-se existir uma forte dependência entre a corrente de excitação ótima e o fluxo de Hélio. Apresentamos também os gráficos típicos das características Corrente X Tensão do plasma formado. Observa-se que apesar da tensão depender do fluxo de Hélio, a resistência incremental é praticamente independente, com característica negativa.

Palavras Chaves: Lasers CO₂, He-N₂-CO₂, Plasma

1. INTRODUÇÃO

As primeiras comunicações sobre os efeitos Lasers no CO_2 foram feitas por Patel [1,2] em 1964. Esta descoberta ocorreu numa época em que a pesquisa para a procura de novas transições de espécies iônicas e moleculares estava na moda. Este fato, somado à pequena potência relativa conseguida nos primeiros experimentos (~ 1 mW), não indicava uma razão para ressaltar sua importância dentre as centenas de outras transições noticiadas neste período.

Legay e Legay-Sommaire [3] rapidamente descobriram um sistema muito mais eficiente baseado na transferência da energia vibracional N_2 ao CO_2 . A adição de N_2 permitiu que Patel [2] aumentasse a potência média de seu sistema de ~ 1 mW para 11,9 W com eficiência de $\approx 3\%$. Resfriando a mistura gasosa para -60°C a eficiência subiu para $\approx 5\%$ [4]. Outro avanço importante foi a adição de He. Patel [5] conseguiu 106 W (6,2% de eficiência) com uma mistura de CO_2 - N_2 -He em um tubo de 230 cm de comprimento, 7,7 cm de diâmetro e refrigeração à água. A partir desses resultados, o Laser de CO_2 conseguiu despertar atenções e adquirir uma posição de destaque em relação aos outros dispositivos Laser. Em 1969, baseado no projeto de Patel, Horrigan [6] e outros construíram um Laser com tubo de ~ 230 m de comprimento, conseguindo uma potência de operação de 8,8 KW contínuos. Beaulieu [7] em 1970, mostrou que era possível a emissão de Laser à pressão atmosférica ou acima, excitando o gás transversalmente de modo que a descarga elétrica passe perpendicularmente ao eixo óptico. Com esta montagem obteve-se pulsos de μs na faixa de kilojoules. O relevante aumento das potências obtidas em Lasers de CO_2 nos últimos 18 anos, desde a primeira comunicação de Patel abriu amplas áreas de aplicações destes equipamentos em pesquisa básica e aplicada como, também em muitas aplicações industriais. Atualmente pode-se adquirir comercialmente Lasers de CO_2 com 10-15 KW de potência contínuos, ou mega-watts por pulso.

A molécula de CO_2 possui um espectro simples e bem conhecido, devido à sua linearidade e ligações covalentes [10] [11]. Três modos fundamentais de vibração são possíveis, com

forme apresentado na fig. 1. O primeiro movimento é uma ν_1 vibração simétrica dos dois átomos de Oxigênio em relação ao de Carbono, ao longo da linha de simetria "C ∞ ". Este movimento é designado pela frequência ν_1 . O modo assimétrico de frequência ν_3 ocorre quando os átomos de Oxigênio se movem na direção contrária à do átomo de Carbono. O modo torcional de frequência ν_2 consiste de duas vibrações degeneradas perpendiculares (ν_{2a} , ν_{2b}). Os comprimentos de onda observados para estas vibrações no CO₂ são |12,13|: $\nu_1 = 1337 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_2 = 667 \text{ cm}^{-1}$ e $\nu_3 = 2349 \text{ cm}^{-1}$.

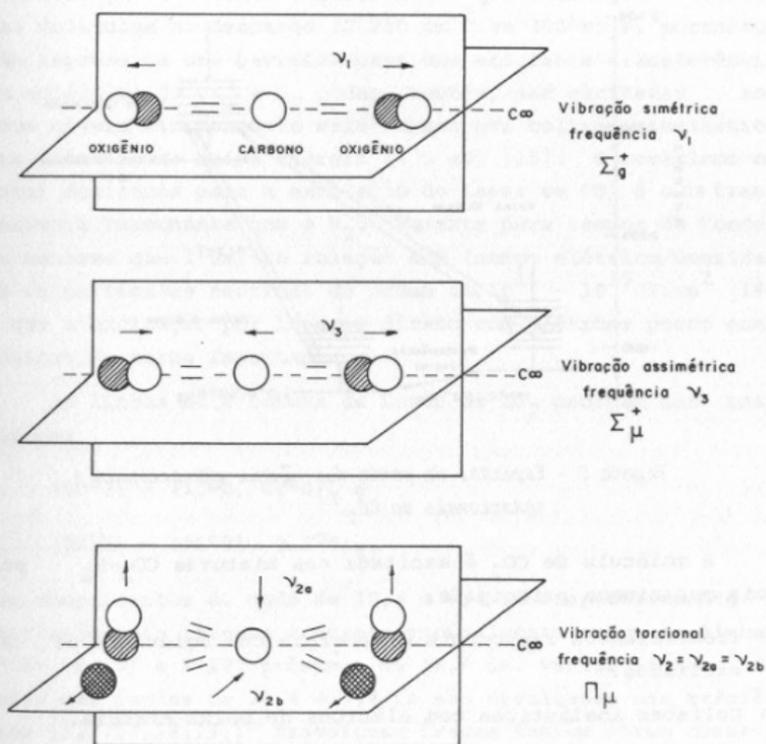


Figura 1 - Modos possíveis de vibração da molécula de CO₂.

Além das vibrações dos átomos de Oxigênio e Carbono entre si, a molécula de CO₂ é livre para rotações. Como o momento angular do elétron em relação ao eixo internuclear é zero para o estado não excitado da molécula de CO₂, pode ser

usado o mesmo formalismo empregado para o cálculo da energia de uma molécula diatômica girando em torno de seu centro de massa. A energia total da molécula de CO_2 pode então ser calculada aproximadamente somando as energias vibracionais e rotacionais. Como a energia rotacional é de valor bem menor que a vibracional no diagrama de energias aparece uma série de linhas correspondentes aos níveis rotacionais sobrepostos aos vibracionais. A título de ilustração, a fig. 2 apresenta parte detalhada do espectro de níveis vibracionais-rotacionais da molécula de CO_2 .

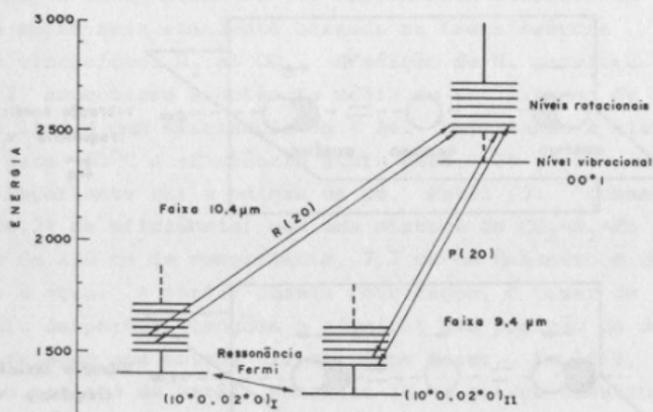


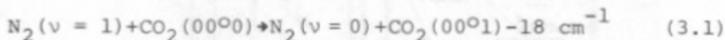
Figura 2 - Espectro de parte dos níveis vibracionais e rotacionais do CO_2 .

A molécula de CO_2 é excitada nas misturas $\text{CO}_2\text{-N}_2$ por dois mecanismos principais:

- 1) Transferência ressonante de energia com moléculas de N_2 excitadas.
- 2) Colisões inelásticas com elétrons de baixa energia.

A molécula de N_2 não possui dipolo elétrico permanente, e por ser diatômica, é inativa no infravermelho. Assim, se for excitada por uma descarga elétrica, as moléculas tendem a ocupar estados vibracionais mais elevados e não podem perder energia por radiação. O primeiro nível de excitação do N_2 ($v = 1$) possui energia aproximadamente igual ao nível (00^0_1)

do CO_2 . Assim, a energia do N_2 excitado pode ser eficientemente transmitida ao CO_2 por colisão intermolecular através da equação:



A taxa de troca energética é:

$$K_2 = 1,9 \times 10^4 / \text{Torr.s em } 300^\circ\text{K} \quad |14|$$

A diferença de 18 cm^{-1} é muito menor que a energia térmica das moléculas na descarga ($\approx 200 \text{ cm}^{-1}$ em 300°K) e, portanto, não representa uma barreira para uma eficiente transferência. As moléculas de CO_2 e N_2 podem, também, ser excitadas aos seus níveis vibracionais mais baixos por colisão inelástica com elétrons de baixa energia ($< 5 \text{ eV}$) |15|. O mecanismo em geral dominante para a excitação do Laser de CO_2 é o da transferência ressonante com o N_2 . Somente para tempos de descarga menores que $1 \mu\text{s}$, ou relação E/N (campo elétrico/densidade de partículas neutras) da ordem de $10^{16} - 10^{15} \text{ V.cm}^2$ |16| é que a excitação por impacto direto com elétrons pouco energéticos se torna importante.

As linhas mais comuns de Laser no CO_2 ocorrem nas transições:



com comprimentos de onda de $10,4$ e $9,4 \mu\text{m}$ respectivamente. A oscilação mais intensa ocorre principalmente entre as linhas P(18), P(20) e P(22) próximas de $10,6 \mu\text{m}$. Várias linhas de Laser nas bandas de $10,4$ e $9,4 \mu\text{m}$ são divulgadas nas referências |1,2,17,18,19|. Transições fracas também foram observadas entre 11 e $18 \mu\text{m}$ |18,19,20|. Considerando também os isótopos presentes, o número de linhas mensuráveis é de algumas centenas |21|. A fig. 3 mostra o diagrama dos níveis energéticos do CO_2 e N_2 , com o mecanismo de excitação e transição Laser.

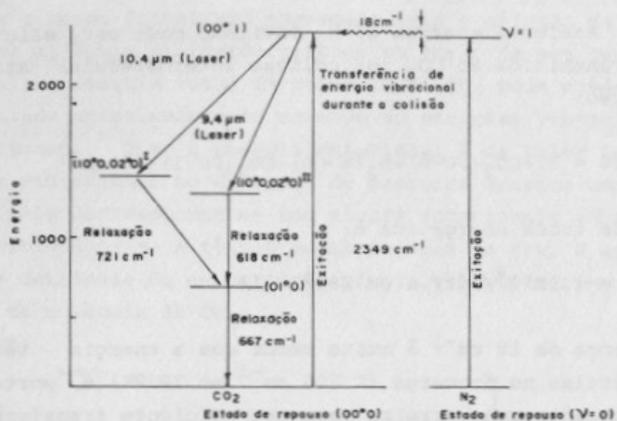


Figura 3 - Diagrama de níveis de energia dos primeiros estados de excitação do CO_2 e N_2 .

Os principais mecanismos de relaxação ocorrem através da colisão entre as próprias moléculas do CO_2 , entre outras moléculas presentes, ou colisão com as paredes da cavidade. O Hélio destaca-se por ser eficientíssimo na relaxação no nível Laser inferior e pouco influir na relaxação do nível Laser superior.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fim de estudarmos experimentalmente a influência da composição gasosa e corrente de excitação em um Laser de CO_2 -CW típico, construímos uma cavidade ressonante com 15 mm de diâmetro e 1,15 mm de comprimento refrigerada com camisa de água a $+15^\circ\text{C}$, espelho plano com 85% de raio de 10 m, para estabilidade da ressonância. Para homogenizarmos a mistura de gases a entrada é feita através do centro da cavidade, com duas saídas nas pontas. A descarga elétrica também foi otimizada com um anodo central e dois catodos nas extremidades da cavidade, sendo perfeitamente controlada através de um gerador de corrente em alta tensão. A fig. 4 mostra um diagrama esquemático do sistema de gases, e todo Laser é descrito em detalhes alhures [22].

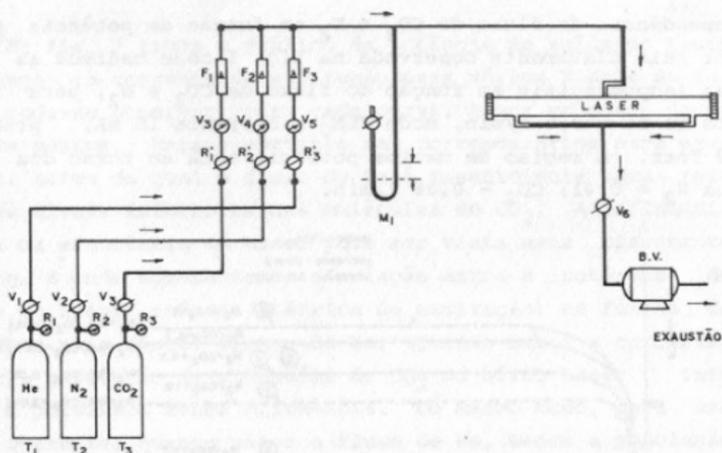


Figura 4 - Diagrama esquemático do sistema de gases.

3. RESULTADOS

Foram observados os modos de ressonância TEM (00,01,02, e 30). Qualitativamente as formas de curva obtidas para os três primeiros modos são similares. Na figura 5 temos, por exemplo, a curva da potência do Laser em função do fluxo de He para vários valores de fluxo de N_2 e CO_2 , para o modo TEM_{01} , corrente 10 mA, pressão 30 Torr. Como pode-se observar, para fluxos de He maiores que 0,5 l/min, a potência do Laser é independente do fluxo de He. Isto pode ser facilmente explicado, visto que a função do He é a de relaxar o nível Laser inferior da molécula do CO_2 , e nestas condições a quantidade de mols de He é aproximadamente sete vezes maior que os mols de CO_2 ($0,5 \text{ lHe}/0,07 \text{ lCO}_2 = 7,14$).

A influência da relação entre o N_2 e CO_2 é mais complexa. Como se observa nas curvas 1 à 6 (fig. 5) a potência aumenta com o aumento da relação N_2/CO_2 . Isto se deve ao fato da molécula de CO_2 ser excitada para o nível Laser superior através das colisões vibracionais com as moléculas de N_2 . Assim, quanto maior a quantidade de N_2 para uma quantidade fixa de CO_2 , maior a potência.

A curva 7 (fig. 5) mostra que mesmo aumentando a relação N_2/CO_2 , mas diminuindo o fluxo de CO_2 , a potência diminui, pois é menor o número de moléculas de CO_2 excitadas. A

dependência do fluxo de CO_2 e N_2 em função da potência pode ser mais claramente observada na fig. 6 onde medimos as curvas isopotenciais em função do fluxo de CO_2 e N_2 , para fluxos de He = 0,5 l/min, modo TEM_{01} , corrente 10 mA, pressão 30 Torr. A região de máxima potência está em torno dos fluxos $\text{N}_2 = 0,41$; $\text{CO}_2 = 0,06$ l/min.

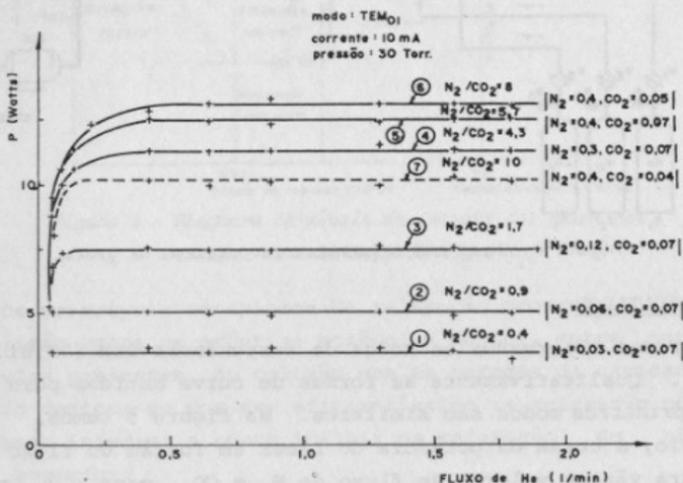


Figura 5 - Potência do Laser em função do fluxo de He para vários fluxos de CO_2 e N_2 .

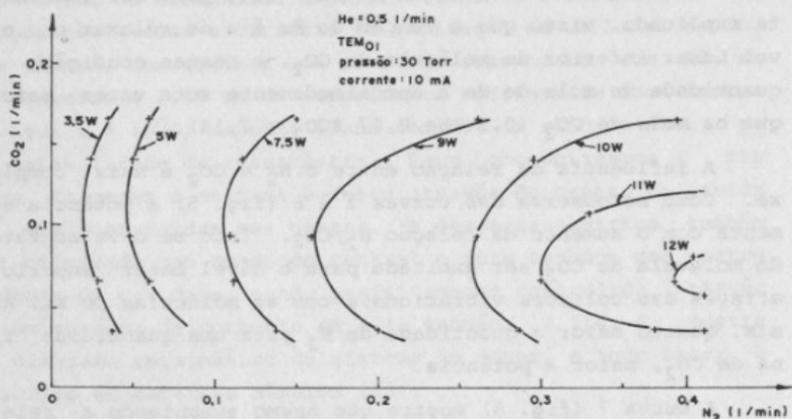


Figura 6 - Curvas isopotenciais do Laser em função dos fluxos de CO_2 e N_2 .

Na fig. 7 temos o gráfico da potência de saída do Laser em função da corrente de excitação para vários fluxos de He. Como pode-se observar, para cada curva, temos um ponto de potência máxima. Existe portanto uma corrente ótima para excitação, acima da qual o fluxo de He é insuficiente para relaxar os níveis inferiores das moléculas de CO_2 . A influência do He na eficiência do Laser pode ser vista mais claramente na fig. 8 onde apresentamos a relação entre a (potência de saída do Laser/potência elétrica de excitação) em função da corrente para vários fluxos de He. Quanto maior a corrente, maior a população de moléculas de CO_2 no nível Laser inferior e portanto, menor eficiência. Do mesmo modo, para uma dada corrente, quanto maior o fluxo de He, menor a população de CO_2 no nível Laser inferior e portanto maior a eficiência. A inflexão da curva 3 para baixas correntes pode ser devido ao fato de que alto fluxo de He deve carregar moléculas de CO_2 para fora da cavidade antes de serem excitadas pela colisão com as de Nitrogênio. A característica corrente-tensão do plasma apresenta uma resistência negativa dependente da corrente. Como pode-se observar na fig. 9, apesar da tensão do plasma depender da quantidade de He, a resistência incremental é praticamente independente variando de $R_p = 82,4 \text{ K}\Omega \pm 9,6\%$ em 5 mA para $R_p = 13,8 \text{ K}\Omega \pm 17\%$ em 100 mA.

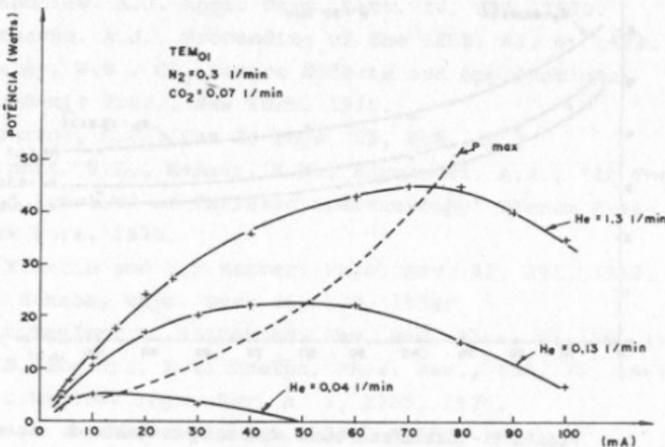


Figura 7 - Dependência da potência de Laser com a corrente de excitação para vários fluxos de He.

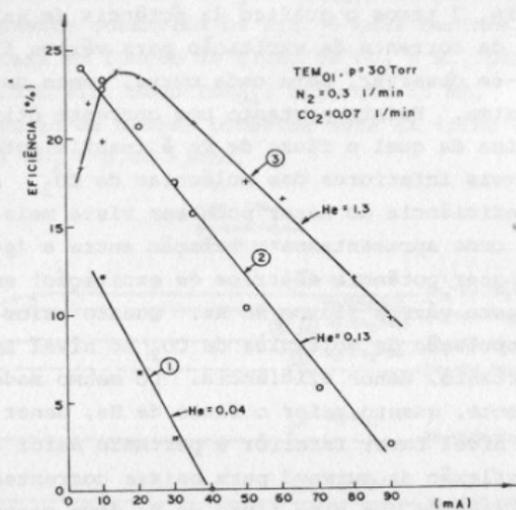


Figura 8 - Eficiência do Laser em função da corrente da excitação para vários fluxos de He.

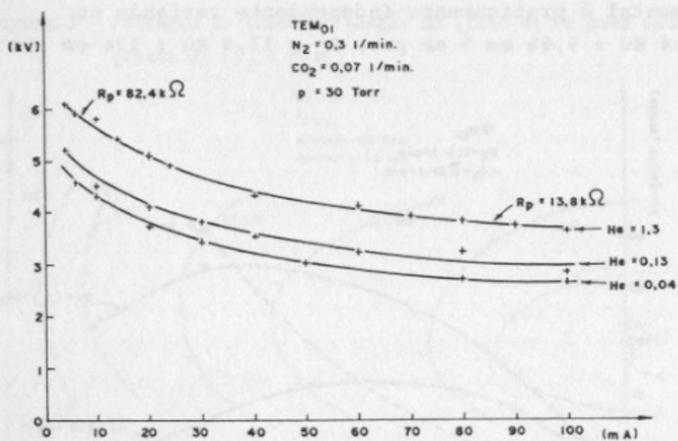


Figura 9 - Características tensão - corrente de plasma.

4. CONCLUSÕES

Através dos dados obtidos pode-se otimizar a operação do Laser em relação a sua potência, eficiência e mínimo consumo de gases. Por exemplo para o modo TEM₀₁ verifica-se que para as condições de fluxo de He = 1,3/N₂ = 0,3/CO₂ = 0,07 l/min, corrente 75 mA, p = 30 Torr, pode-se obter uma potência máxima de 45 watts com eficiência de 14,8%. Já para o modo TEM₀₀, de maior ganho, nas condições de (He = 1,8, N₂ = 0,3/CO₂ = 0,07 l/min, corrente 77 mA, p = 30 Torr) consegue-se atingir uma potência total de 104,3 watts, (ou 90,6 watts/m) com eficiência de 28,2%.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Patel, C.K.N., Phys. Rev. Lett. 12, 588, 1964.
- [2] Patel, C.K.N., Phys. Rev. Lett. 13, 617, 1964.
- [3] Legay, F., and Legay-Sommaire, N.C.R.Acad. Sci. 259B, 99, 1964.
- [4] Bridges, T.J., and Patel, C.K.N. Appl. Phys. Lett. 7, 244, 1965.
- [5] Patel, C.K.N., et al; Appl. Phys. Lett. 18, 25, 1965.
- [6] Horrigan, F., Klein, C., Rudko, R., and Wilson, D. Microwaves 8, 68, 1969.
- [7] Beaulieu, A.J. Appl. Phys. Lett. 16, 504, 1970.
- [8] Demaria, A.J., Proceeding of the IEEE, 61, 6, 1973.
- [9] Duley, W.W., CO₂ Lasers Effects and Applications; Academic Press, New York, 1976.
- [10] Courtoy, C.P., Can J. Phys. 35, 608, 1957.
- [11] Alpert, N.L., Keiser, E.W., Szymanski, A.H., "Ir Theory and Practice of Infrared Spectroscopy" Phenum Press - New York, 1970.
- [12] P.E.Marin and E.F.Barker, Phys. Rev. 41, 291, 1932.
- [13] I. Hanson, Phys. Rev. 46, 122, 1934.
- [14] R.L.Taylor, S. Bitterman, Rev. Mod. Phys. 41, 26, 1969.
- [15] R.D.Habe Jr., A.V. Phelps, Phys. Rev., 158, 70, 1967.
- [16] W.L.Nighaw, Phys. Rev. A. 2, 1989, 1970.
- [17] C.K.N. Patel, Phys. Rev. 136, A 1187, 1964.
- [18] C.Frapard, P. Laures, M. Roulet, X. Ziegler and Legay - Sommaire N., C.R. Acad. Sci. 262B, 1389, 1966.

- [19] J.A.Howe, Appl. Phys. Lett., 7, 21, 1965.
 [20] B.Hartman., B. Kleman, Can. J. Phys. 44, 1609, 1966.
 [21] C.Freed, L.C.Bradley, R.G. O'Donnell, IEEE J. Quant.
 Electr. QE - 16 - 11, 1980.
 [22] V. Baranauskas, a ser publicado.