

Projecto e construção de um laser em fase gasosa

por JOSÉ ANTÓNIO RIBERA SALCEDO

(Aluno do 5.º Ano de Engenharia Electrotécnica, Universidade do Porto)

1. É apresentado o projecto e a execução dum tipo particular de laser: um laser de dióxido de carbono, azoto e hélio. O projecto e a execução foram feitos em casa, em tempo livre, de Outubro de 1971 a Janeiro de 1973. Os resultados estão de acordo com os dados experimentais conhecidos para este tipo de laser.

1.1. Motivação [1, 2]

São conhecidas as características dum feixe laser, e a sua vasta aplicação em Telecomunicações. Se fosse possível aliar a estas qualidades, uma elevada potência em funcionamento normal e uma elevada transmissividade atmosférica, a situação seria ideal para desenvolver um canal óptico de transmissão de informação.

Interessei-me especialmente na banda de comprimentos de onda infravermelhos entre 8 e 14 μm , de muita elevada transparência atmosférica, conhecida há muito. Por outro lado, quis desenvolver um laser de gás, utilizando uma descarga eléctrica como meio de excitação; assim seria fácil operar experimentalmente com o sistema, dado o princípio de funcionamento simples e as dimensões apreciáveis.

Assim, ou utilizaria átomos ou moléculas, como meio activo onde instalaria a inversão de população. Gases atómicos não são propícios a emissões infravermelhas, pois as transições correspondentes a estes comprimentos de onda dão-se entre níveis de energia próximos do limite de ionização e muito pouco espaçados entre si. Por outro lado, querendo utilizar a excitação atómica por colisões com electrões acelerados pelo campo da descarga, o rendimento seria baixo, pois teria que excitar os átomos a níveis elevados, para depois decaírem em fotões de baixa energia. Ainda, a selectividade seria mínima, dado o afastamento mínimo entre níveis de interesse. O rendimento seria da ordem de 1/1000, e a inversão da população seria fraca. Átomos não servem.

Com gases moleculares é totalmente diferente: existem graus de liberdade adicionais, pelo que os seus níveis de energia se encontram quantificados quanto à configuração electrónica, vibração e rotação da molécula. Em primeira aproximação serão independentes. Se analisarmos a distribuição da energia pelos níveis vibracionais da configuração electrónica fundamental duma molécula, dum modo geral, os níveis têm valores baixos

de energia, e estão convenientemente espaçados entre si. Ainda, as transições situam-se na banda de comprimentos de onda que me interessava.

Escolhi assim um meio activo molecular, instalando uma inversão da população de dois níveis vibracionais baixos, da configuração electrónica fundamental das moléculas que escolheria.

Pretendia funcionamento contínuo do laser, e não por impulsos, o que tem vantagens em Telecomunicações. Havia então de existir um nível laser superior, e um nível laser inferior. Pretendia, claro, uma excitação selectiva e rápida do nível laser superior, e um despovoamento rápido do nível laser inferior. O tempo de vida da molécula no nível laser superior teria de ser elevado, e a sua desexcitação pouco rápida. Moléculas diatómicas têm tempos de vida nos seus níveis vibracionais muito curtos, pelo que não seriam convenientes. Moléculas triatómicas têm uma estrutura energética mais complexa, pelo que os tempos de vida vibracionais são geralmente mais elevados. Convém assim para funcionamento em laser contínuo. Isto é devido ao incremento nos graus de liberdade.

Analisando várias moléculas triatómicas, a molécula de dióxido da carbono parece conveniente, pois é simples (linear e simétrica), e está publicada uma grande quantidade de informação espectroscópica sobre a sua estrutura vibracional e rotacional. Assim, foi a que utilizamos, pelas mesmas razões que Patel o fez em 1964, para constituinte fundamental do meio activo.

1.2. Base espectroscópica [3]

A transição a $10.6\ \mu\text{m}$ é a mais conveniente para utilizar na emissão laser, devido às probabilidades de transição serem propícias (Vêde fig. 1).

A partir de bases espectroscópicas, podem-se determinar os tempos de relaxação de cada modo de vibração, ou seja, de cada nível em jogo. Assim, queremos popular muito rapidamente e selectivamente o nível A. O nível superior A é convenientemente (selectiva e rapidamente) excitado adicionando azoto em

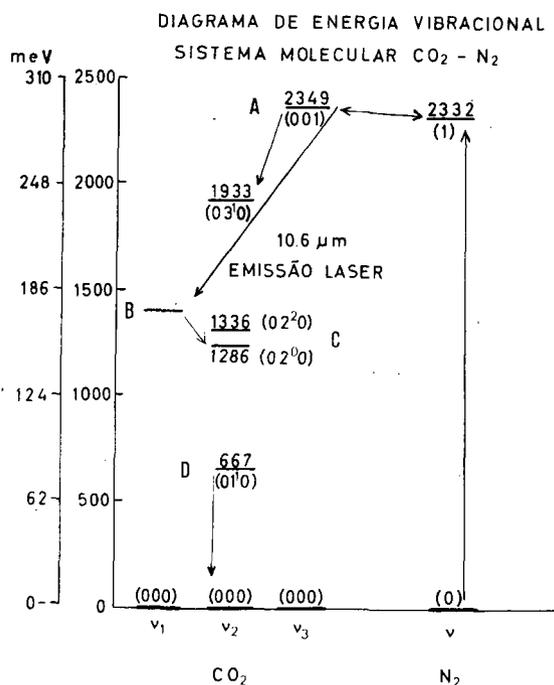


Fig. 1

certa quantidade, dada a quase ressonância dos níveis vibracionais em jogo. Como o povoamento do nível inferior é feito por excitação térmica, interessa manter a temperatura do plasma baixa. Quanto ao nível laser inferior B, ele está em equilíbrio com C, dada a quase ressonância entre os dois. Por outro lado, decai muito rapidamente para D. O nosso problema quanto ao nível inferior, está assim no despovoamento rápido de D. Este nível é eficazmente despovoado adicionando uma certa proporção de hélio ao dióxido de carbono, dada a desproporção das massas, o que aumenta muito o número de colisões não adiabáticas.

Analizando as equações de continuidade das diversas populações, obtemos uma solução exponencial para a inversão da população após a aplicação do impulso de corrente. Falamos assim em constante de tempo do ganho, e esta constante de tempo é fundamental na análise e otimização do mecanismo de excitação.

Seja

N_i — população do nível (i).

τ_i — tempo de relaxamento do nível (i)

σ_i — secção eficaz de excitação por colisão com electrões, do estado fundamental para o nível (i)

α — função de excitação. Depende da densidade electrónica do plasma, e da distribuição de energia do gás electrónico

β — constante de transferência ressonante de energia.

γ — probabilidade de transição entre os níveis vibracionais (0) e (1) do N_2 .

Assim, do diagrama,

$$\frac{d}{dt}(\gamma N_0) = \alpha \sigma_1 N_0 + \beta N_{001} N_0 - \gamma N_0 \beta N_{000} - \gamma N_0 / \tau_1$$

$$\frac{d}{dt}(N_{001}) = \alpha \sigma_{001} N_{000} + \gamma N_0 \beta N_{000} - \beta N_{001} N_0 - N_{001} / \tau_{001}$$

$$\frac{d}{dt}(N_{100}) = \alpha \sigma_{100} N_{000} + N_{001} / \tau_{001} - N_{100} / \tau_{001}$$

A equação resultante é de terceira ordem; no segundo membro pode destacar-se a função de excitação, nula como condição fronteira. A sua integração nas várias condições de funcionamento do plasma, conduz a uma solução exponencial para a inversão da população $N_{001} - N_{100}$, variável que nos interessa. Este estudo diferencial é muito extenso, pelo que não o faço aqui por brevidade.

1.3. A descarga [4]

A potência de feixe é proporcional ao número de fótons que abandona o sistema por unidade de tempo. Logo, ao ganho do sistema que, pela expressão de Füchtbauer-Ladenburg, é proporcional à inversão da população, $N_A - N_B$. Este depende da constante térmica do gás, da ordem dos milisegundos. Ela é suficientemente longa para utilizar impulsos de corrente com vantagem de atingir ganhos elevados sem atingir a saturação térmica. Utilizando impulsos de 50 Hz, isto acontece ainda. Mais, a constante térmica é suficientemente curta, para que entre dois picos sucessivos de corrente, possa ocorrer um arrefecimento substancial do plasma.

Cada pico começa assim com o gás quase à temperatura ambiente. Interessa garantir um arrefecimento eficaz, rodeando o tubo de plasma com uma manga refrigerante de água em circulação.

2. Apresento agora os aspectos construtivos do laser. O sistema foi concebido prevendo alterações futuras, pelo que foi projectado e construído numa forma modular, com relativa independência entre as várias partes. Considerarei assim o módulo mecânico, eléctrico, óptico e de gases. Esta divisão não é só construtiva, mas paralelamente, funcional [5, 6, 7].

2.1. Módulo mecânico

Consiste em dois suportes de aço que mantêm os eléctrodos, e servem de apoio às duas partes móveis (orientáveis), que ajustam os espelhos. Os eléctrodos mantêm entre si o tubo de plasma, envolvido pela manga de circulação de água. (Vêde fig. 2). Os dois suportes de aço pesam cada um cerca de 50 kg. Os electrodos são em latão e bronze fosforoso (elevada resistência à abrasão). O tubo de plasma é em

quartzo puro, de 5 mm de espessura, e está envolvida por uma manga refrigeradora de água, limitada por um tubo de cobre. As partes móveis estão rigidamente ligadas aos parafusos micrométricos, e sujeitas às partes fixas por três molas

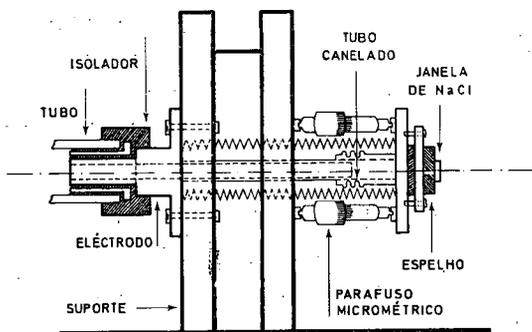


Fig. 2

fabricadas de acordo com a constante elástica necessária, calculada. A continuidade é mantida utilizando tubos de aço em harmónica, que permite a orientação relativa das partes, e prolonga os electrodos até aos espelhos. Estes estão rigidamente li-

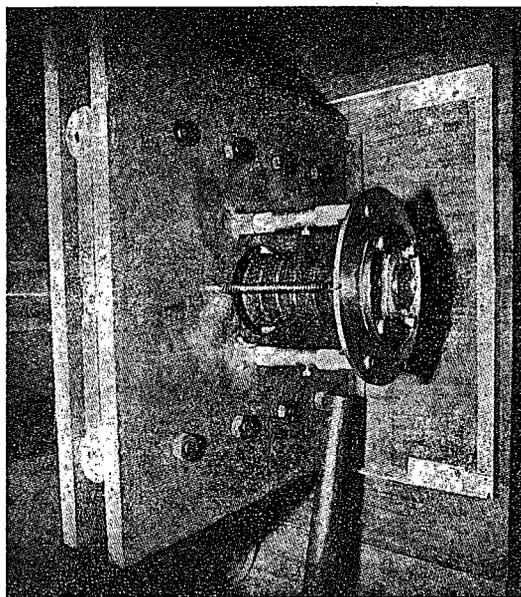


Fig. 3 — Sem a protecção de Pespex, pode-se ver um aspecto do cátodo à direita.

gados a dois discos cromados presos às partes móveis por quatro parafusos e um anel em «0» lubrificado com Apiezon. Os discos são em latão de 5 mm. O conjunto está montado sobre uma base de 10 kg de madeira prensada de 5 cm, e protegido por caixas de Pespex espesso, que encaixam em cantoneiras de alumínio anodizado. Todas as entradas e saídas estão cuidadosamente isoladas. O peso da unidade é de 120 kg.

2.2. Módulo eléctrico

É constituído por um transformador Schell 220/12 kV, 800 VA, limitador automático de corrente, uma ponte rectificadora de diodos, onda completa (18 kV, 70 mA), cabos HCN especial, uma caixa de comando e miliamperímetro de descarga (DC 100 mA). Já foi justificada esta alimentação atrás.

2.3. Módulo de gases [6]

Consta das garrafas de CO_2 , He (45), N_2 (R), dos redutores de pressão (corpo simples para CO_2 e N_2 , corpo duplo para He), das válvulas de ajuste micrométrico, de precisão, à saída de cada um deles, dos tubos alimentadores e de escape, do manómetro de óleo (Silicone Fluid 702, Edwards) de escalas de medição, das tabelas numéricas de calibração automática do manómetro entrando com temperaturas e condições iniciais de cada dia, e da bomba rotativa de óleo PSR 1 da NGN (44 l/min, 5.10^{-5} Torr).

O manómetro foi inteiramente construído e calibrado em casa, claro. Permite doseamentos das pressões parciais dos gases até à centésima de Torr. Este ponto é particularmente importante no doseamento do CO_2 , em que a pressão parcial óptima é bastante crítica: 0.35 ± 0.08 Torr. Nos outros gases, o ajuste da pressão par-

cial já não é tão crítico, como seria de esperar.

Verifica-se uma grande concordância com as pressões que, experimentalmente são óptimas, e as indicadas como tal em publicações sobre este tipo de laser.

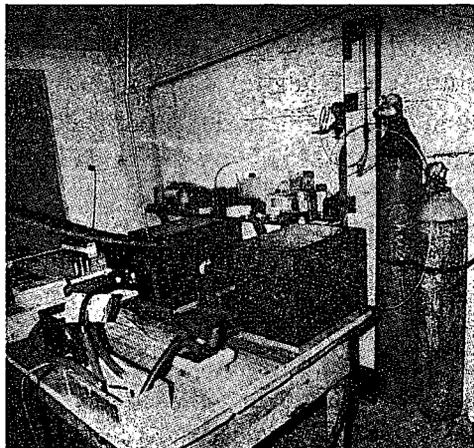


Fig. 4 — Aspecto conjunto da instalação e dos vários módulos.

2.4. Módulo óptico [8, 9, 10]

É constituído por dois espelhos dieléctricos, espelhados a ouro, reflectividade 99% a $10.6\mu\text{m}$. O espelho do cátodo é concavo, com uma curvatura calculada de modo a permitir selecção de modos, e funcionamento em TEM_{00} , o que não é possível de forma exacta devido às perdas por difracção na janela de NaCl serem, para funcionamento em modo TEM_{00} , importantes.

Porém determinou-se experimentalmente o perfil do campo electromagnético do feixe laser, e verificou-se oscilar essencialmente no modo fundamental. Este ponto será discutido mais tarde.

O espelho de ânodo é plano, com um furo central de 2.3 mm por onde sai o feixe, coberto por uma janela de NaCl polido ópticamente (Harshaw Chemical Co.), especialmente transparente a $10.6\mu\text{m}$, e barato. Os espelhos foram colimados

por interferometria, ao nível da fracção de comprimento de onda, utilizando para isso um laser de HeNe, 1.5mW, 6328Å ; .8mrad de divergência do feixe. A precisão foi elevada, e a operação de alinhamento durou cerca de duas semanas, num total de 20 horas de trabalho.



Fig. 5 — Espelho de cátodo, e montagem.

3. Posto o laser a funcionar, o seu ponto de funcionamento óptimo foi determinado por tentativas. Após um elevado número de horas de trabalho, foi possível assentar nas pressões parciais abaixo indicadas, como sendo as que conduzem a maior potência de saída:

CO_2	0.38 Torr
He	6.28 Torr
N_2	1.92 Torr

Estes valores estão de acordo com os valores encontrados nas publicações sobre

este tipo de laser. Ainda, o arrefecimento por água mostrou-se eficaz, mesmo com caudais baixos: 10l/min.

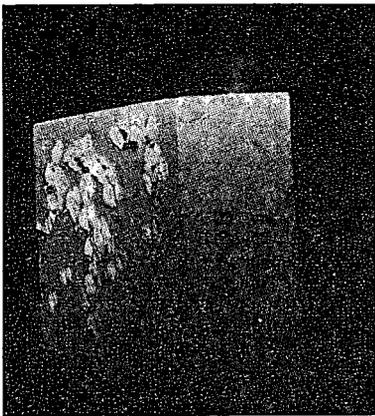


Fig. 6 — O efeito do feixe sobre uma superfície plástica, foi fundi-la instantaneamente.

4. Já efectuei algumas experiências com o sistema: A sua execução foi sempre demorada, mas os resultados foram animadores:

Primeiro, determinou-se o ponto de funcionamento óptimo. A potência desenvolvida nessas condições, se bem que não a tenha medido rigorosamente por não ter ainda preparado o processo de a medir, situa-se nas *dezenas de Watt*, o que é muito elevado.

Segundo, determinei o perfil transversal do campo electromagnético do feixe, tendo podido concluir que é predominantemente gaussiano.

Terceiro, introduzindo um desalinhamento progressivo no espelho do cátodo, foi possível separar o modo fundamental TEM_{00} , o modo TEM_{01} , e o modo TEM_{02} . A separação conseguida foi notável. Esta experiência será possivelmente relatada em trabalho futuro. Neste momento estou a proceder a uma quantificação dos resultados, processando as fotografias obtidas por computador, para obter as

curvas de nível do campo electromagnético.

Quarto, modularei duma forma elementar o feixe, e farei a sua detecção num ponto afastado. Tentarei assim, um pequeno (não em capacidade de transmissão!) canal de comunicação óptico. Para isso disponho já dum pirodetector SBN (Strontium (x) Barium (1-x) Niobate) da Harshaw, com uma detectividade de $10 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, tempo de subida 50ns, capacidade 9pF, e resistência de 10^{12} ohm .

Finalmente, poderei ir estudando em todos estes pontos, os problemas de *ruído às frequências ópticas*, que é o que no fundo mais me interessa. Sobretudo, claro, quando fizer transmissão elementar de informação com o laser, o que comparado com a sua construção, não é difícil.

5. Conclusão

Este trabalho descreve estudos e experiências ao longo de mais de um ano e meio. Foi um período de situações difíceis, curiosas e até únicas, e contactos de grande interesse. Valeu a pena tudo.

O sistema está à disposição de todos. O importante era desmitificar a experimentação do amador. E estudar coisas maravilhosas...

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. K. N. PATEL, *High Power Carbon Dioxide lasers*, Scientific American Readings on light, 1968, p. 265-275.
- [2] R. C. CRAFER, A. F. GIBSON, M. J. KENT, M. F. KIMHITT, *Time dependent processes in CO₂ laser amplifiers*, 1969, Brit. J. Appl. Phys., Ser. 2, Vol. 2, p. 183-185.
- [3] R. L. TAYLOR, S. BITTERMAN, *Survey of Vibrational Relaxation Data for processes important in the CO₂-N₂ laser system*, Rev. Mod. Phys., Vol. 41, No. 1, 1969, p. 26-47.
- [4] B. LENGYEL, *Lasers, Second Edition*, J. Wiley, 1971, p. 26.

- [5] C. K. N. PATEL, *Selective excitation through vibrational energy transfer and optical maser action in N₂-CO₂*, Phys. Rev. Letters, **13**, p. 617-619, 1964.
- [6] A. L. S. SMITH, *Molecular Composition. Changes in a flowing CO₂-N₂-He-H₂₀ laser*, J. App. Phys. D, Vol. 2, Ser. 2, 1969, p. 1129-1133.
- [7] R. M. OSGOOD, W. C. EPPERS, *High Power CO₂-N₂-He laser*, Appl. Phys. Letters, **13**, p. 409-411, 1968.
- [8] H. KOGELNIK, T. LI, *Laser Beams and Resonators*, Proc. IEEE, **54**, Oct. 1966, p. 1312-1329.
- [9] E. D. BOYD, H. KOGELNIK, *Generalised Confocal Resonator theory*, Bell. S. T. J., **41**, p. 1347-1349, July 1962.
- [10] G. SIMONSOHN, *Moden des Fabry-Perot-Resonators mit ebenen parallelen Spiegeln*, Optica Acta, **19**, No. 1, p. 45-79, 1972.

II — Experiências escolares com o osciloscópio de raios catódicos em que se utiliza a base de tempo

por RÓMULO DE CARVALHO

O maior interesse do osciloscópio de raios catódicos reside na possibilidade de nos fornecer sinais luminosos, no alvo, que traduzem, graficamente, variações de tensão em função do tempo.

Quando se pretende estudar, sem osciloscópio, variações dessa natureza relativamente a um dado circuito, poder-se-ão recolher dados numéricos obtidos por meio de instrumentos de medida apropriados (medidas de tensões e medidas de tempo) e com eles traçar um gráfico utilizando um sistema de coordenadas rectangulares em que no eixo das abcissas se marcam os valores dos tempos e no das ordenadas os valores das tensões.

Um dos grandes merecimentos do osciloscópio é exactamente o de nos fornecer esse mesmo gráfico, já feito, no alvo.

Para conseguir tal resultado existe, no osciloscópio, certa montagem eléctrica que permite fazer aparecer, no alvo, um traço luminoso horizontal que corresponde ao eixo dos tempos nos gráficos que habitualmente se desenham. A visão desse traço resulta de um movimento muito rápido a que é sujeito o ponto luminoso provocado pelo feixe electrónico em virtude de certas tensões aplicadas às placas

verticais contidas no tubo. Os valores dessas tensões sucedem-se, desde um mínimo até um máximo, aumentando continuamente de tal modo que o sinal pontual luminoso se desloca, horizontalmente, com movimento uniforme, o que quer dizer que o deslocamento do ponto é uma função linear do tempo. Atingido o valor máximo da tensão, esta desce bruscamente até o referido mínimo, obrigando o ponto luminoso a regressar à posição inicial. O processo vai-se repetir, exactamente nas mesmas condições, e repete-se com uma frequência suficiente para que o observador veja, no alvo, um traço luminoso de certo comprimento, estacionário.

Designa-se este traço por *base de tempo*, e designa-se por *tensão de varredura* (*tension de balayage*) qualquer valor da tensão que se utilize para deslocar o sinal luminoso nas condições referidas.

O gráfico da figura 33 traduz as variações de tensão de varredura com o tempo. O segmento AB corresponde ao crescimento uniforme da tensão que ao alcançar o valor máximo V_m (ponto B) desce rapidamente (segmento BC) a um valor mínimo. B' C representará o inter-