

# Desenvolvimento de Moduladores Acústico-Ópticos Aplicados ao Controle Temporal da Potência de Lasers\*

Edison P. Maldonado†, Gessé E. C. Nogueira e Nilson D. Vieira Junior

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN/SP*

*Supervisão de Materiais Optoeletrônicos - MMO*

*Caixa Postal 11049 - CEP 05422-970 - São Paulo/SP - Brasil*

Recebido em 20 abril de 1994

## Resumo

Moduladores acústico-ópticos são largamente utilizados para controle do regime temporal de lasers. Esses dispositivos são constituídos de um meio transparente à radiação luminosa onde se propagam ondas acústicas que induzem variações no índice de refração. Usualmente, as ondas acústicas são geradas por um elemento piezoelétrico mecanicamente acoplado ao meio de propagação. Os detalhes de construção destes dispositivos são descritos no texto. Vários moduladores acústico-ópticos especificamente projetados para chaveamento-Q ou acoplamento de modos de lasers continuamente bombeados foram construídos e suas características foram estudadas. Os moduladores desenvolvidos foram utilizados em lasers de Nd, tanto no regime de chaveamento-Q, com geração de pulsos de 200 ns de duração, quanto no regime de acoplamento de modos, com geração de pulsos de 45 ps de duração.

## Abstract

Acousto-optic modulators are widely used to control the temporal behavior of lasers. These devices are made by using optically transparent material where the acoustic waves propagate, inducing changes in the refraction index. Usually, the acoustic waves are generated by a piezoelectric transducer that is mechanically coupled to the transparent material. The construction of these devices, including the technological aspects, is discussed. Some acousto-optic modulators specifically designed to operate in the Q-switching or mode-locking regime for continuously pumped lasers were built and their behaviors characterized. The developed modulators were used in Nd lasers, leading to the generation of 200 ns pulses in the Q-switched operation and 45 ps pulses in the mode-locking regime.

## I. Introdução

A interação acústico-óptica caracteriza-se por um efeito de difração da luz incidente, devido uma perturbação periódica do índice de refração de um meio, gerada por uma onda acústica<sup>[1,2,3]</sup>. A intensidade de luz difratada depende tipicamente de *cinco fatores*<sup>[4,5]</sup>: (1) o tensor foto-elástico do meio, (2) a potência acústica, (3) o regime de difração, (4) o comprimento

de onda óptico e (5) o casamento entre as divergências dos feixes óptico e acústico.

Moduladores acústico-ópticos são comumente usados para o controle temporal da potência óptica intracavidade em lasers de baixo ganho. Assim, esses dispositivos são empregados principalmente para atuarem como *chaveadores do fator de qualidade do ressonador laser* e como *moduladores síncronos das intensidades dos modos longitudinais do laser*. No caso de dispositivos com onda acústica viajante, o tempo de chave-

\*Apoio financeiro FINEP

†Bolsita de Doutorado FAPESP

amento óptico é limitado principalmente pela velocidade do som no meio, pelo diâmetro do feixe óptico e pelo casamento entre as divergências dos feixes óptico e acústico<sup>[6]</sup>. Para moduladores com onda acústica estacionária, a velocidade de chaveamento depende principalmente da frequência da onda acústica, além dos fatores que determinam a intensidade de luz difratada. Tipicamente<sup>[4]</sup>, dispositivos acústo-ópticos (AO) introduzem uma perda passiva inferior a 0,5% e são capazes de atingir ativamente uma perda de até 90%.

Neste trabalho, apresentaremos uma descrição simples para o projeto e a caracterização de moduladores acústo-ópticos aplicados ao controle temporal da potência de lasers, assim como os resultados do desenvolvimento de moduladores para chaveamento-Q e acoplamento de modos. Esses moduladores podem ser desenvolvidos com baixo custo e tecnologia 100% nacional.

## II. Descrição teórica

### II.1. Dispositivos ultrasônicos

A estrutura usual de dispositivos ultrasônicos tais como **moduladores e defletores de luz** consiste em um transdutor (lâmina de material piezoelétrico), acoplado por uma de suas faces com um meio de propagação, no qual irradia energia em forma de ondas acústicas, geralmente no modo *longitudinal*.

A amplitude do campo acústico oscilando na frequência  $f$  (tipicamente no intervalo de KHz a GHz) depende de<sup>[7-9]</sup>: a espessura do transdutor,  $t$ , a velocidade de propagação acústica no meio piezoelétrico,  $V$ , a impedância acústica do meio piezoelétrico,  $Z_0$ , o fator de acoplamento piezoelétrico para o modo longitudinal,  $k$ , a constante dielétrica relativa do meio piezoelétrico,  $K$ , a área da lâmina de piezoelétrico,  $A$ , e a impedância acústica do meio de propagação,  $Z_M$ . A análise deve também considerar os parâmetros relativos às camadas intermediárias entre a lâmina e o meio de propagação (camada de cola, eletrodos, etc.). A figura 1 mostra o esquema geral desse dispositivo.

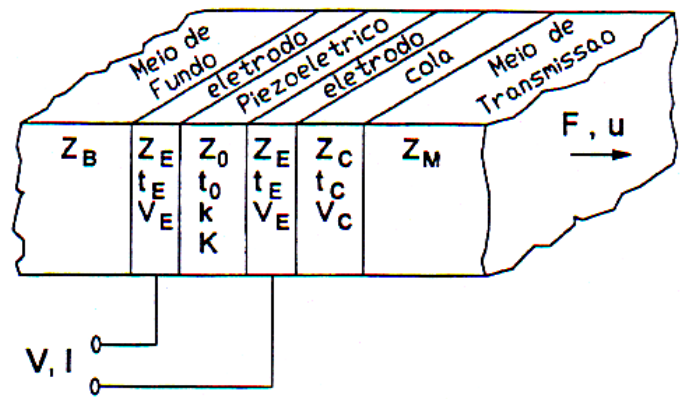


Figura 1: Esquema de um dispositivo ultrasônico, com destaque para as camadas intermediárias e traseira.  $Z_i$  é a impedância acústica,  $t_i$  é a espessura e  $V_i$  é a velocidade de propagação acústica, em cada meio.

### - O modelo equivalente

A eficiência eletro-acústica de um dispositivo ultrasônico deste tipo pode ser avaliada utilizando-se o circuito equivalente elaborado por Mason<sup>[7-9]</sup> e aperfeiçoado por Sittig<sup>[10,11]</sup>. A figura 2 apresenta um modelo equivalente considerando uma camada intermediária entre o transdutor e o meio de propagação.

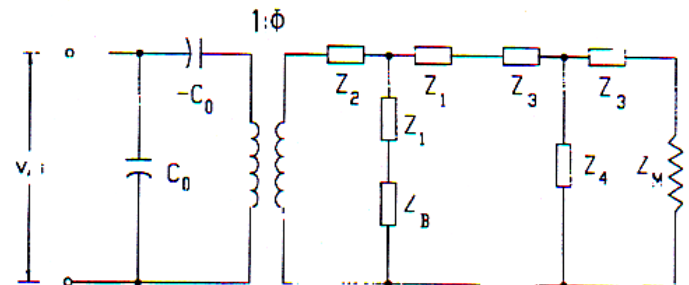


Figura 2: Circuito elétrico equivalente para o dispositivo descrito na figura 1. Os diversos elementos são descritos no texto.

Neste modelo, os parâmetros do transdutor piezoelétrico são: a capacitância do transdutor,  $C_0 = \epsilon_0 \cdot K \cdot A / t$ ; a razão de transdução,  $\phi^2 = \omega_0 \cdot C_0 \cdot Z_0 \cdot k^2 / \pi$ ; a frequência de ressonância do transdutor,  $\omega_0 = \pi \cdot V / t$ ; e as impedâncias imaginárias  $Z_1 = j \cdot Z_0 \cdot \tan[(\pi/2) \cdot (\omega/\omega_0)]$  e  $Z_2 = -j \cdot Z_0 / \sin[\pi(\omega/\omega_0)]$ . Os elementos que correspondem à camada de cola são:  $Z_3 = j \cdot Z_c \cdot \tan[(\pi/2) \cdot (\omega/\omega_c)]$ ,  $Z_4 = -j \cdot Z_c / \sin[\pi \cdot (\omega/\omega_c)]$  e  $\omega_c = \pi \cdot V_c / t_c$ , onde  $V_c$ ,  $t_c$  e  $Z_c$  são a velocidade do som, a espessura e a impedância acústica da cola, respectivamente. O meio propagador acústico é descrito por um elemento puramente dissipativo, de impedância elétrica

equivalente correspondendo ao valor da sua impedância acústica,  $Z_M$ .

**- Efeito da sintonia por um indutor em paralelo**

Para um acoplamento ótimo do dispositivo é ideal que a impedância elétrica resultante seja puramente resistiva (fase nula), com magnitude de  $50 \Omega$ . Entretanto, devido à predominância da capacitância da lâmina piezoelétrica, é necessário a utilização de um indutor sintonizável em paralelo, que permite a maximização da eficiência de conversão elétrica para acústica.

**- Acoplamento com a fonte de rádio-frequência**

O acoplamento de impedâncias com a fonte de potência elétrica é feito tipicamente através de um auto-transformador no próprio indutor de sintonia. Entretanto, como o auto-transformador introduz perdas de potência por irradiação, deve-se otimizar os parâmetros de construção do dispositivo para exigir a mínima razão de transformação. A figura 3 mostra os resultados do cálculo da impedância elétrica final (sem o auto-transformador), em função da *espessura da camada de cola*,  $t_c$ . Utilizou-se uma análise matricial do circuito equivalente<sup>[10]</sup>. O sistema considerado é formado por um transdutor de quartzo (direção X) acoplado com cola do tipo epoxi a um meio propagador de sílica. Nesse cálculo, considerou-se o sistema já *sintonizado* por um indutor variável em paralelo que otimiza a eficiência de conversão para 100%, *para cada valor de espessura da camada de cola*. Assim, torna-se claro que o dispositivo com camada de cola de espessura  $\Lambda_c/4$ , onde  $\Lambda_c$  é o comprimento de onda acústico na cola, leva a um valor da impedância elétrica mais próximo de  $50 \Omega$  (neste exemplo). Isso se deve ao fato de que as impedâncias acústicas do transdutor e do meio propagador são muito próximas, e a camada de cola antirressonante ( $\Lambda_c/4$ ) desacopla parcialmente o ressonador piezoelétrico do meio propagador.

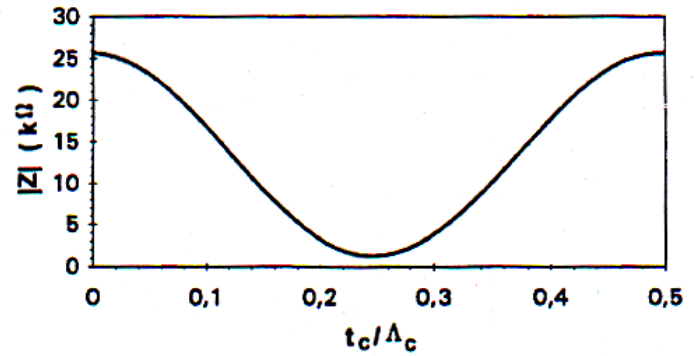


Figura 3: Impedância elétrica do dispositivo considerado no texto em função da espessura da camada de cola.

**II.2. Interação acústo-óptica**

Os dois regimes mais importantes de interação acústo-óptica são: o efeito Debye-Sears (ou difração de Raman-Nath)<sup>[12,13]</sup> e o regime de Bragg<sup>[14]</sup>. As condições necessárias para a existência de um ou outro efeito são resumidas pelo parâmetro  $Q$ :

$$Q = \frac{K^2 \cdot L}{k}$$

onde  $k$  é o comprimento de onda óptico,  $K$  é o comprimento de onda acústico e  $L$  é o comprimento de interação. Um critério para a existência de  $n$  ordens de difração (regime Raman-Nath) é dado por  $(n \cdot Q) \ll 1$ . Define-se por “regime de Bragg” o regime no qual todas as ordens de difração são extintas, o que corresponde a  $Q \gg 1$ . Neste caso entretanto, se o ângulo de incidência for igual ao ângulo de casamento de fase, o feixe óptico é difratado em uma única ordem, em completa analogia com a difração de raios-X ou nêutrons em cristais. O ângulo de casamento de fase é chamado *ângulo de Bragg*,  $\Theta_B$ , sendo definido por:

$$\Theta_B = \text{arc sen} \left( \frac{\lambda}{2\Lambda} \right)$$

No regime de Bragg e para incidência no ângulo de Bragg, a eficiência de difração,  $\eta$ , que corresponde à razão entre a intensidade de luz difratada,  $I_1$ , e a incidente,  $I$ , é dada por<sup>[15]</sup>

$$\eta = \frac{I_1}{I} = \text{sen}^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_0 \cdot \cos \Theta_B} \cdot \sqrt{\frac{L}{2 \cdot H} M_2 \cdot P_{ac}} \right)$$

onde  $\lambda_0$  é o comprimento de onda óptico no vácuo,  $H$  é a altura da frente de onda acústica (na aproximação de

onda plana e desprezando efeitos de difração),  $P_{ac}$  é a potência da onda acústica e  $M_2$  é uma figura de mérito acústo-óptico do material.

### II.3. Moduladores acústo-ópticos para aplicações intracavidade laser

O perfil temporal da modulação, para chaveamento-Q otimizado de lasers contínuos, corresponde a aberturas de janelas temporais de transmissão em um intervalo temporal muito menor do que o período do ciclo. Tipicamente, a frequência da modulação varia de 0 a 50 KHz e a janela temporal de transmissão tem largura típica de alguns  $\mu s$ . Assim, moduladores acústo-ópticos de onda viajante (ou evanescente) são requeridos para esta aplicação.

Quando acionado, o modulador introduz uma perda óptica no ressonador, que deve impedir a oscilação laser (perdas > ganho máximo). Assim, o ganho é elevado para valores muito acima dos valores de regime (ou de limiar). Quando a onda acústica é desligada, o modulador retorna ao seu estado usual de alta transmissão. O alto valor de ganho atingido e o baixo valor das perdas, levam à geração de um pulso laser gigante<sup>[16]</sup>. Devido à limitação da máxima perda que os moduladores acústo-ópticos podem introduzir na cavidade, eles são normalmente utilizados para chaveamento-Q em lasers c.w., onde o ganho é geralmente baixo (e.g. laser de Nd:YAG). Tipicamente, os pulsos gerados com esta técnica possuem uma potência-pico da ordem de  $10^5$  W e duração na casa de 100 ns.

A técnica de obtenção do regime de acoplamento de modos<sup>[16,17]</sup> utilizando-se um modulador acústo-óptico, consiste na modulação ativa das perdas da cavidade laser, com um período síncrono com o tempo de vôo dos fótons no ressonador. Tipicamente, isso corresponde a uma frequência de modulação da ordem de 100 MHz. Uma maneira simples e usual de se obter estas altas frequências de modulação é utilizar-se um dispositivo com onda acústica estacionária. Como a onda de stress é estacionária, a modulação óptica ocorre na frequência igual a duas vezes a frequência da onda acústica (ou seja, da onda de RF injetada).

Dependendo da largura espectral do meio de ganho,

pode-se obter pulsos laser com duração de centenas de ps a sub-picossegundos, com potências-pico típicas de até  $10^4$  W. Outro parâmetro determinante da largura temporal dos pulsos gerados é a profundidade da modulação acústo-óptica.

De maneira geral, as condições de operação requeridas para o modulador acústo-óptico são:

a) O meio acústo-óptico deve ser altamente transparente no comprimento de onda utilizado e as superfícies ópticas devem conter filmes anti-refletores (ou em ângulo de Brewster) para não introduzir perdas passivas significativas.

b) A frequência acústica deve ser tal que o ângulo entre o feixe difratado e o transmitido seja maior que duas vezes o ângulo de difração do feixe intracavidade (modo TEM<sub>00</sub> do ressonador), para eliminar efeitos parasitas de reinjeção da 1ª ordem de difração. Assim:  $\Lambda \leq (\pi \cdot w_0/4)$ , onde  $w_0$  é a cintura do feixe intracavidade<sup>[16,17]</sup>. Tipicamente,  $w_0$  é maior que 200  $\mu m$ . Assim,  $\Lambda$  deve ser inferior a 160  $\mu m$ .

c) A eficiência de difração,  $\eta$ , deve ser suficiente para que as perdas introduzidas ultrapassem a condição de limiar do laser, ou seja:

$$R \cdot (1 - \eta)^2 \cdot G \leq 1$$

onde  $R$  é a refletividade do espelho de saída do laser, tipicamente igual a 0,9 e  $G$  é o ganho líquido duplo-passo do laser. Para lasers contínuos de Nd, bombeados por lâmpadas,  $G$  assume valores entre 1,5 e 2,0 (tipicamente)<sup>[16,18]</sup>. Assim,  $\eta$  deve estar na faixa entre 0,14 e 0,25, nesse caso.

d) Para o modulador projetado para chaveamento-Q (onda acústica viajante), a velocidade de chaveamento (tempo de subida do feixe transmitido) deve ser menor que o tempo de formação do pulso na cavidade, tipicamente 100 ns para lasers contínuos de Nd. [16]

## III. Materiais e Técnicas

### III.1. Meio de interação

A escolha do meio de interação deve considerar: (1) a eficiência de difração requerida, ou seja, o valor de  $M_2$ ; (2) o valor da constante de atenuação acústica

na frequência a ser utilizada; (3) a velocidade de propagação acústica, no caso de operação chaveada; (4) o limiar de dano óptico; (5) a transmissão óptica no comprimento de onda a ser utilizado; (6) estabilidade química e mecânica; (7) baixa dependência das constantes físicas com a temperatura.

O material mais utilizado para moduladores intracavidade laser tem sido a sílica fundida, devido às suas excelentes qualidades ópticas e mecânicas, tais como alto limiar de dano, alta velocidade de propagação acústica, baixa absorção acústica na faixa de MHz e alta transmissão óptica no visível e infravermelho próximo. Entretanto, a sílica fundida apresenta um baixo valor para a constante  $M_2$ , comparado a outros materiais<sup>[15]</sup>. Parâmetros deste material são: índice de refração  $n = 1,46$ ; constante de atenuação acústica  $\Gamma = 12 \text{ dB/cm.GHz}^2$ ; velocidade de propagação acústica  $V = 5,95 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$ ; impedância mecânica  $Z = 13,1 \cdot 10^6 \text{ kg/s.m}^2$ ; figura de mérito acústo-óptico  $M_2 = 1,51 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$ .

Deve-se ressaltar que a constante  $M_2$  depende da polarização óptica. Na sílica fundida, por exemplo, a polarização óptica perpendicular ao plano dos vetores de propagação óptico e acústico apresenta uma eficiência de deflexão 5 vezes maior do que a polarização paralela<sup>[15]</sup>.

### III.2. Transdutor piezoelétrico

O transdutor piezoelétrico e a sua colagem ao meio propagador são o segundo fator mais importante na construção do modulador acústo-óptico. As características de alguns materiais piezoelétricos comumente usados para a confecção de transdutores são mostrados na tabela 1. A análise teórica, apresentada no item II.I, mostra que o fator de acoplamento piezoelétrico para o modo longitudinal é um parâmetro importante na escolha do material piezoelétrico. Quanto maior esse fator, mais fácil é a sintonia e o casamento de impedâncias com a fonte de rádio-frequência, levando à diminuição das perdas de acoplamento elétrico. Por outro lado, a constante dielétrica do material não deve possuir um valor muito elevado, pois dificulta este mesmo acoplamento<sup>[9]</sup>. Portanto, é vantajoso escolher o mate-

rial com mais alta razão  $k/K$ .

Outro fator a ser considerado é a diferença entre as impedâncias acústicas do transdutor e do meio de propagação. A espessura ótima da camada de cola, no contexto do discutido no item II.I, depende fortemente desta diferença de impedâncias, e para casos particulares pode ser minimizada ( $t_c \ll \Lambda_c$ ), ganhando-se em largura de banda e simplicidade.

### III.3. Colagem do transdutor ao meio propagador

Compostos de resina epoxi são os mais úteis para a realização de colagens de boa estabilidade térmica na faixa de  $0^\circ$  a  $80^\circ \text{ C}$ . A impedância acústica destes materiais é baixa, comparada às de outros materiais sólidos, estando na faixa de  $3 \cdot 10^6 \text{ kg/s.m}^2$ , o que faz com que camadas de cola com espessuras superiores a  $1 \mu\text{m}$  afetem significativamente as características do dispositivo. A colagem deve ser uniforme e sem tensões mecânicas. A camada de cola deve ser livre de bolhas de ar ou partículas sólidas, para não haver espalhamento do campo acústico e para evitar superaquecimento da região do transdutor. Essa homogeneização pode ser obtida com o uso de uma pequena prensa, com contatos de borracha, para pressionar a lâmina durante a colagem. Isso permite a obtenção de camadas de cola homogêneas, com um espessuras da ordem de  $\mu\text{m}$ . Esta prensa deve ser retirada antes da secagem, aliviando as tensões introduzidas pelo dispositivo.

## IV. Construção e caracterização dos moduladores

### IV.1. Considerações gerais

O material escolhido como meio acústo-óptico foi a sílica fundida, pelos motivos expostos no item III.1.

Utilizamos dois diferentes tipos de materiais piezoelétricos: o quartzo, na seção-X e o niobato de lítio, no corte  $36^\circ\text{Y}$ . O quartzo é um material bastante conhecido como meio piezoelétrico<sup>[9]</sup>. O niobato de lítio é um material com qualidades piezoelétricas superiores às do quartzo para aplicações de alta frequência, tais

Material	Orientação	Fator de acoplamento $k$	Constante dielétrica relativa K	Constante de frequência (MHz, $\mu\text{m}$ )	Impedância mecânica ( $10^6 \text{ kg/s.m}^2$ )
SiO <sub>2</sub>	X	0,10	4,6	2850	15,1
LiNbO <sub>3</sub>	35° Y Z	0,49	39	3700	34,8
		0,17	29	3660	34,4
ZnO (filme)	0°	0,28	8,9	3200	36,4
PZT-7A	0°	0.50	235	2400	33,8

Tabela 1: Características de alguns materiais comumente usados para transdutores de rádio frequência. A orientação indicada é a apropriada para excitação do modo longitudinal

como, a sua maior constante de frequência (que permite a confecção de transdutores mais espessos do que os de quartzo, para uma mesma frequência de operação) e o seu maior fator de acoplamento piezoelétrico<sup>[9]</sup>.

Para cinturas do feixe óptico ( $w_0$ ) maiores que 200  $\mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  deve ser inferior a 160  $\mu\text{m}$  (vide ítem II.3). Como a velocidade de propagação acústica na sílica é  $V = 5960 \text{ m/s}$ , a frequência de operação deve ser tal que:  $f \geq 38 \text{ MHz}$ . Escolhemos a frequência  $f = 50 \text{ MHz}$ , o que implica em um comprimento de onda  $\Lambda = 120 \mu\text{m}$ . O comprimento de interação é obtido a partir da condição para o Regime de Bragg<sup>[4]</sup>:

$$Q = (2\pi\lambda/\Lambda^2) \cdot L \geq \sim 15$$

Para lasers de Nd,  $\lambda \simeq 1\mu\text{m}$ , temos:  $L \geq 3,2 \text{ cm}$ .

A altura do feixe acústico, H, deve ser minimizada para a obtenção de máxima intensidade acústica na região de interação. No entanto, H deve ser maior ou igual ao diâmetro do feixe óptico,  $2w_0$ . Um critério razoável é que H corresponda a duas vezes o máximo diâmetro do feixe óptico. Para  $w_0 < 800\mu\text{m}$ , tomou-se  $H = 3 \text{ mm}$ .

No caso dos moduladores com onda acústica viajante, utiliza-se um meio dissipador acústico acoplado ao final do bloco propagador, de maneira a absorver as ondas acústicas. Para esta finalidade, o material escolhido foi o alumínio, devido à sua impedância acústica

ser muito próxima à da sílica e ter alta condutividade térmica, dissipando a potência absorvida rapidamente.

De acordo com a análise da difração de Bragg, a potência acústica necessária para se atingir uma eficiência de difração de 25% em  $\lambda = 1\mu\text{m}$  é, para este dispositivo,  $P_{ac} = 4 \text{ W}$ . Entretanto, devido às perdas de acoplamento elétrico, uma potência elétrica aproximadamente três vezes maior é normalmente necessária<sup>[19]</sup>.

#### IV.2. Modulador acústico-óptico para chaveamento-Q

Dois moduladores com onda acústica viajante foram desenvolvidos, ambos utilizando blocos de sílica fundida como meio propagador. A geometria e as dimensões destes blocos são mostradas na figura 4. As superfícies A, A' e C, indicadas na figura, possuem uma planicidade de  $\lambda/5$ . As outras superfícies são finamente lapidadas, apenas<sup>[20]</sup>. Na superfície traseira dos blocos de sílica foram colados absorvedores das ondas acústicas, consistindo em blocos de alumínio, utilizando-se para isso uma cola epoxi condutora (com pó de prata). Cada modulador utiliza um transdutor piezoelétrico diferente: no primeiro, uma lâmina de quartzo no corte X; no segundo, uma lâmina de niobato de lítio no corte 36°Y.

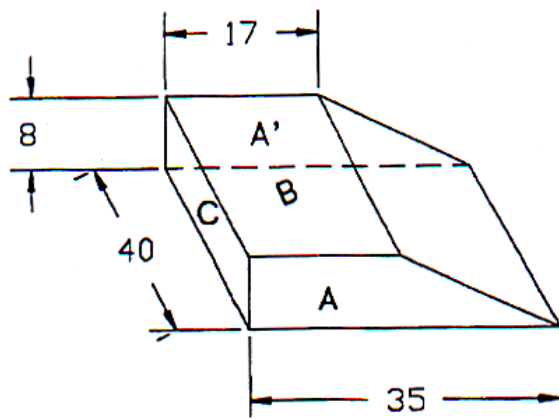


Figura 4. Geometria e dimensões do bloco acústo-óptico para o modulador de onda acústica viajante (em mm).

Um monocristal de quartzo de dimensões  $(20 \times 6 \times 4)$   $\text{cm}^3$  foi cristalograficamente orientado pela técnica de difração de raios-X.<sup>[21]</sup> Uma lâmina, de superfície  $(38 \times 7)$   $\text{mm}^2$ , foi extraída no plano perpendicular ao eixo-X com uma precisão angular da ordem de  $1^\circ$ , sendo depois lapidada e polida até a espessura final de  $171 \pm 8$   $\mu\text{m}$ . Esta espessura corresponde a meio comprimento de onda para  $f = 16,67$  MHz (fundamental) estando o terceiro harmônico em 50 MHz. Assim, operando-se o transdutor no terceiro harmônico, evita-se lidar com lâminas muito finas. A precisão na espessura, relacionada com o paralelismo das faces, significa uma qualidade acústica de  $\Lambda/15$  (onde  $\Lambda \cong 120 \mu\text{m}$ ). As superfícies foram polidas até uma qualidade óptica (*planicidade*) de  $\lambda/2$ , para auxiliar na posterior colagem ao bloco.

O transdutor de  $\text{LiNbO}_3$ , utilizado no outro modulador, foi lapidado a partir de uma lâmina previamente orientada<sup>[22]</sup>, na direção cristalográfica  $36^\circ\text{Y}$ . A espessura final atingida foi  $t = 224 \pm 7 \mu\text{m}$ , para operar no 3º harmônico em  $f = 50$  MHz. O polimento foi executado de forma análoga ao descrito anteriormente (no caso da lâmina de quartzo).

Nas superfícies B e C dos blocos foram depositados filmes de alumínio para contato elétrico. Em seguida, os transdutores foram colados nas superfícies C de cada bloco (fig.4), utilizando-se uma cola epoxi bastante fluida. Após a mistura dos componentes, a cola foi aquecida levemente (usamos um jato de ar aquecido) para eliminar micro-bolhas de ar, e espalhada na superfície C dos blocos. As lâminas de piezoelétrico foram

depositadas sobre estas superfícies. Utilizou-se em seguida um "jig" para diminuir a espessura da camada de cola, que foi posteriormente retirado, conforme descrito no item III.3. Obteve-se assim camadas de cola de espessura uniforme, livres de bolhas ou partículas sólidas, livres de tensões, e de espessura final inferior a  $2 \mu\text{m}$ . As espessuras das camadas de cola foram estimadas a partir de medidas utilizando-se um relógio comparador micrométrico, com precisão de  $2 \mu\text{m}$ .

Após a secagem completa da cola (no nosso caso 24h a uma temperatura de  $40^\circ$ ), filmes de alumínio foram depositados nas superfícies externas das lâminas. As dimensões deste filme determinam a área da frente de onda acústica gerada no bloco. Assim, as dimensões do filme foram:  $L = 37$  mm e  $H = 3$  mm, de acordo com o discutido no item IV.1.

O conjunto formado pelo bloco de sílica e a lâmina foi então acoplado a um suporte de alumínio, para sustentação mecânica, apoiado em um conjunto que permite o ajuste do ângulo de Bragg. A figura 5 mostra a montagem final do conjunto. Os diversos materiais utilizados para a colagem permitem a livre expansão térmica dos diversos materiais em contato e ainda assim garantem um bom contato elétrico e dissipação térmica.

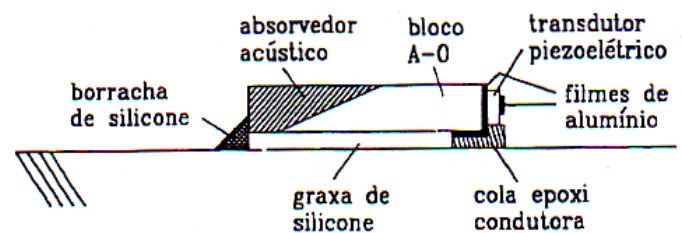


Figura 5. Materiais utilizados para o acoplamento dos diversos elementos do modulador de onda viajante.

O contato elétrico com o filme de alumínio na superfície da lâmina foi feito com um pequeno fardo prensado de palha de aço macia<sup>[23]</sup>. Um contato uniforme pôde ser assim obtido, sem introduzir efeitos de dissipação acústica pela parte traseira da lâmina.

O acoplamento elétrico foi feito pelo uso de indutores de sintonia, a partir de cálculo realizado utilizando o modelo equivalente, que consistem em algumas espiras de fio rígido (diâmetro da espira: 1cm). No caso do dispositivo com transdutor de quartzo, o indutor possui 6 espiras. Uma derivação entre a primeira e a segunda

espira foi conectada à linha de  $50 \Omega$  (fonte), assim o indutor foi também usado como auto-transformador de impedâncias. A sintonia fina do indutor com o dispositivo foi feita variando-se levemente o comprimento do indutor. Buscou-se a configuração que gera um campo elétrico máximo entre as faces da lâmina piezoelétrica, para  $f = 50 \text{ MHz}$ . O casamento de impedâncias foi monitorado utilizando-se um medidor de onda refletida.

Para o modulador que utiliza transdutor de niobato de lítio, a sintonia com um indutor em paralelo resulta em uma impedância final de módulo da ordem de  $50 \Omega$  e fase inferior a  $10^\circ$ , evitando assim o uso de um auto-transformador.

#### - Caracterização do modulador de onda viajante

As eficiências de difração dos moduladores foram medidas utilizando-se um laser de Nd:YAG ( $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ ). Os moduladores foram excitados por uma fonte de rádio-frequência totalmente desenvolvida em nossos laboratórios<sup>[24]</sup>, que fornece  $15 \text{ W}$  de potência em  $f = 50,00(5) \text{ MHz}$ . O modulador com transdutor de quartzo apresentou  $\eta = 0,06$  e o com transdutor de  $\text{LiNbO}_3$  apresentou  $\eta = 0,25$ , para a polarização óptica favorável ( $E \perp K$ ). A baixa eficiência do modulador com transdutor de  $\text{SiO}_2$  é devido à não otimização da espessura da camada de cola, que é de espessura muito inferior a  $\Lambda/4$ . Isto leva à utilização de um casador de impedâncias que introduz altas perdas elétricas, como discutido no item II.1.

A fonte de rádio-frequência permite o chaveamento da RF, com taxa de repetição variável entre  $0,5$  e  $50 \text{ KHz}$ . Nesse caso, o tempo de evanescimento da RF é de  $100 \text{ ns}$ , sendo que a RF permanece desligada por um tempo ajustável entre  $0,5$  e  $2,5 \mu\text{s}$ . Os tempos de chaveamento óptico dos moduladores foram então medidos, utilizando-se para isto um detetor de Si (PIN) com tempo de resposta inferior a  $1 \text{ ns}$  e um osciloscópio analógico de  $500 \text{ MHz}$ .

A figura 6 mostra o perfil temporal da modulação do feixe defletido, para ambos os moduladores. A escala vertical é normalizada. No caso do modulador com transdutor de quartzo (linha contínua), o tempo

de chaveamento é da ordem de  $100 \text{ ns}$  (limitado pela fonte). Para o modulador com transdutor de niobato de lítio (linha tracejada), o tempo de chaveamento é de  $\sim 500 \text{ ns}$ . Esse tempo mais longo pode ser decorrente da diferença de impedâncias acústicas entre o  $\text{LiNbO}_3$  e a sílica, somada a uma espessura fina da camada de cola, o que resulta em um fator de qualidade mais alto para o ressonador piezoelétrico. Entretanto, devido à alta eficiência de difração deste dispositivo, este tempo de chaveamento é tolerável para o chaveamento-Q do laser contínuo.

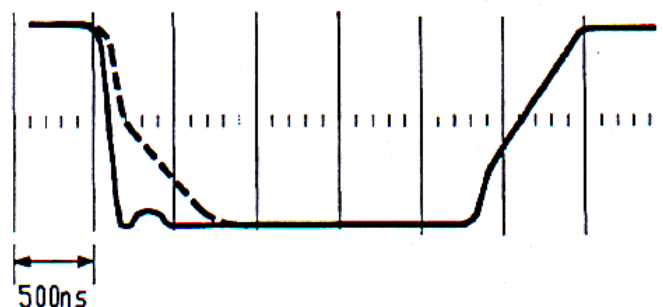


Figura 6. Modulação temporal do feixe óptico defletido pelos moduladores de onda viajante. A linha tracejada corresponde ao modulador com transdutor de  $\text{LiNbO}_3$ ; a contínua corresponde ao modulador com transdutor de quartzo. A escala vertical é normalizada.

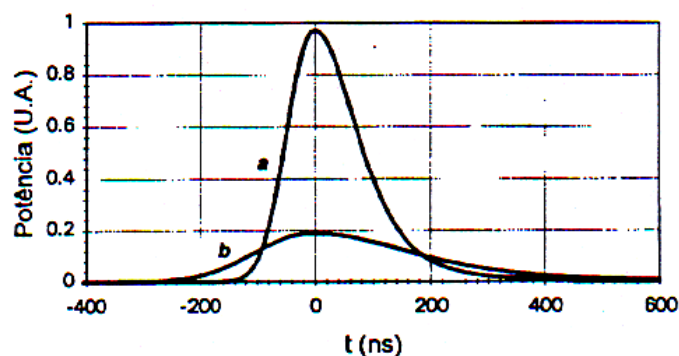


Figura 7. Perfis temporais típicos dos pulsos laser obtidos com a técnica de chaveamento-Q em um laser de Nd:YAG, utilizando-se os moduladores de onda viajante desenvolvidos. A curva a corresponde à taxa de repetição de  $500 \text{ Hz}$ ; a curva b corresponde a  $5 \text{ kHz}$ .

Perfis temporais típicos dos pulsos laser obtidos com esta técnica e com estes moduladores em um laser contínuo de Nd:YAG são mostrados na figura 7, para duas taxas de repetição diferentes. A  $500 \text{ Hz}$ , a largura à meia altura dos pulsos é de aproximadamente  $150 \text{ ns}$ ; a  $5 \text{ kHz}$  esta largura corresponde a aproximadamente  $300 \text{ ns}$ ; nesta última taxa de repetição, a potência-pico dos pulsos é de somente  $20\%$  da dos pulsos a  $500 \text{ Hz}$ <sup>[16]</sup>.

**IV.3. Modulador acústo-óptico para travamento de modos**

O esquema geral do modulador de onda estacionária é apresentado na figura 8. Foi utilizado um bloco de sílica fundida com dimensões:  $L = 40$  mm,  $H = 10$  mm,  $D = 20$  mm e com paralelismo de  $3 \mu\text{m}$  entre suas superfícies<sup>[25]</sup>, como verificado utilizando um micrômetro do tipo relógio comparador.

O transdutor piezoelétrico utilizado consistiu em uma lâmina de  $\text{SiO}_2$ , seção-X, confeccionada conforme descrito no item 4.2. A espessura final da lâmina foi  $162(4) \mu\text{m}$ , o que corresponde ao terceiro harmônico em  $52.7(5)$  MHz.

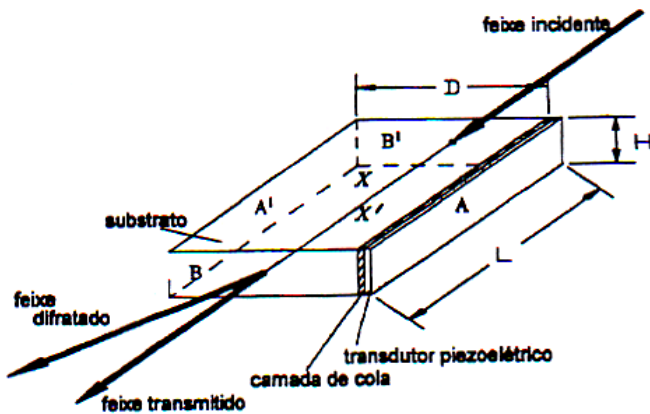


Figura 8. Esquema geral de um modulador acústo-óptico de onda estacionária.

Sobre as superfícies A e X' do bloco de sílica foi depositado um filme de alumínio para contato elétrico. A seguir a lâmina piezoelétrica foi colada à face A, seguindo o mesmo procedimento utilizado para o caso dos moduladores de onda viajante. Sobre a face externa da lâmina foi depositado um outro filme de alumínio que, em conjunto com o primeiro, permite a excitação elétrica do transdutor.

Ao bloco de sílica foram acoplados dois blocos de cobre (refrigerados a água), nas suas faces X e X' (vide fig.8), para a estabilização térmica do conjunto, e consequentemente a estabilização das frequências de ressonância acústica do bloco acústo-óptico. Os blocos de cobre foram acoplados ao de sílica por meio de um uso misto de pasta condutora térmica, borracha de silicone e cola epoxi condutora elétrica, de maneira similar à utilizada para os moduladores de onda viajante (vide

figura 5). Nas faces B e B' do bloco foram depositados filmes anti-refletores para  $\lambda \cong 1 \mu\text{m}$ .

O sistema completo foi incorporado a um suporte mecânico especialmente desenvolvido para permitir o contato elétrico adequado, com tolerâncias mecânicas para acomodação térmica dos diversos componentes.

A sintonia e o casamento elétrico de impedâncias, para o uso do dispositivo acoplado a uma fonte de  $50 \Omega$ , foi executado a partir de cálculos teóricos obtidos pelo uso do modelo equivalente e de medidas simples do fator de qualidade final do dispositivo, para uma determinada ressonância acústica. O modulador, quando conectado a um indutor de sintonia em paralelo (no nosso caso de indutância igual a  $325 \text{ nH}$ ), apresenta uma impedância residual real, na casa de  $2 \text{ k}\Omega$  (calculada). Dessa maneira, sendo o indutor construído com seis espiras, a rádio-frequência foi injetada por uma derivação na primeira espira, funcionando o indutor também como auto-transformador de impedâncias (razão de transformação de 36 vezes). Com esta configuração, o modulador reflete menos de 1% da potência elétrica fornecida pela fonte.

**- Caracterização do modulador de onda estacionária**

A figura 9 é uma reprodução do comportamento temporal do feixe transmitido pelo modulador desenvolvido. Como a potência máxima fornecida pela fonte de RF *sintonizável* que dispomos é de quatro watts, o modulador desenvolvido introduz uma perda ativa máxima (pico) de 13% por passo para  $\lambda = 1053 \text{ nm}$ . O feixe transmitido pelo modulador ajusta-se muito bem ao comportamento teórico ideal esperado para este dispositivo, onde a transmissão é dada por<sup>[26]</sup>

$$T = \cos^2[\delta \cdot \sin(\Omega \cdot t)]$$

onde  $\Omega$  é a frequência da onda de RF injetada e  $\delta$  é o parâmetro de profundidade de modulação, correspondendo aproximadamente a 0,75 para  $\lambda_2 = 514,5 \text{ nm}$  e 0,037 para  $\lambda_1 = 1053 \text{ nm}$ , para 4 watts fornecidos pela fonte de RF.

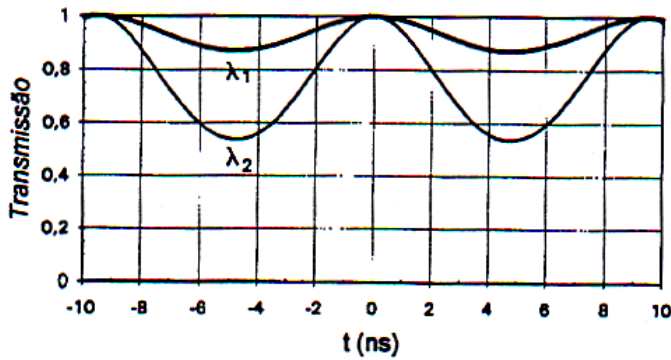


Figura 9. Comportamento temporal do feixe transmitido pelo modulador de onda estacionária desenvolvido.

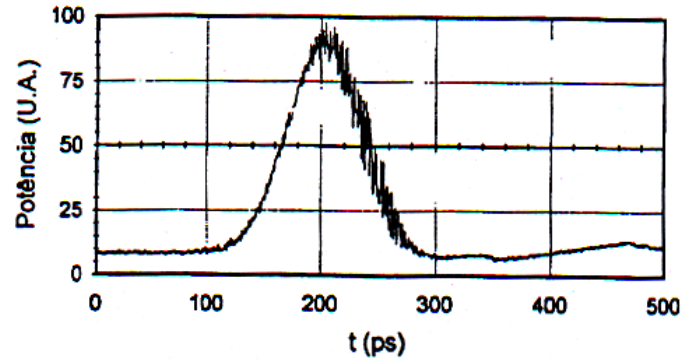


Figura 10. Pulsos laser obtidos utilizando-se a técnica de acoplamento de modos em um laser de Nd:YLF por meio do modulador de onda estacionária desenvolvido. O trem de pulsos possui um período de 9,5 ns.

O modulador de onda estacionária foi inserido na cavidade de um laser de Nd:YLF bombeado por um laser de Argônio ( $\lambda_p = 514,5$  nm), que fornece 55 mW em  $\lambda = 1053$  nm.<sup>[27]</sup> O modulador, posicionado próximo ao espelho de saída, foi operado na frequência correspondente ao inverso do tempo de vôo dos fótons no ressonador, no nosso caso aproximadamente 105 MHz. O laser, operando no regime de acoplamento de modos, produziu um trem de pulsos ultracurtos cuja redução da largura temporal dependeu de um ajuste de frequência na sétima casa decimal (dezenas de Hz). Os pulsos foram observados utilizando-se um detector de InGaAs ultra rápido (Opto-Electronics model PD50), de tempo de resposta igual a 50 ps. O sinal desse detector foi captado por um amostrador de alta performance (Tektronics SD-26 Sampling Head), com 17,5 ps de tempo de subida e taxa de amostragem de 200 kHz. Esse sinal de amostragem foi observado em um osciloscópio digital (Tektronics CSA 803).

A largura temporal à meia altura dos pulsos observados no osciloscópio foi de 70 ps, como mostra a figura 10. Considerando-se o tempo de resposta de 53 ps do sistema de detecção, pode-se estimar que a duração dos pulsos ópticos é de 45 ps. Os pulsos possuem uma variação de amplitude inferior a 2%, como observado em um osciloscópio analógico de 100MHz (de frequência de resposta), e uma instabilidade temporal ("jitter") da ordem de dez picosegundos, estimada a partir dos sinais de amostragem.

## V. Conclusão

Neste trabalho, apresentou-se uma descrição teórica simples e adequada para o projeto e a caracterização de moduladores acústico-ópticos para aplicações intracavidade laser. Tais moduladores foram desenvolvidos com tecnologia totalmente doméstica, a um custo baixo.

Os moduladores de onda viajante podem ser empregados para o chaveamento-Q de lasers contínuos de Nd, fornecendo com esta técnica pulsos com largura temporal típica da ordem de 200 ns, portanto comparáveis às obtidas com moduladores comerciais. De acordo com a nossa experiência, as maiores dificuldades no desenvolvimento deste tipo de modulador consistem no acoplamento de impedâncias elétricas e na estabilização térmica do dispositivo. Para o acoplamento eletromecânico, utilizou-se uma análise teórica que permitiu a identificação da contribuição de cada parâmetro de construção do dispositivo.

O modulador de onda estacionária resultou bastante adequado para a aplicação desejada, como verificado pela sua caracterização. Este modulador foi inserido na cavidade de um laser contínuo de Nd:YLF, modulando ativamente as perdas intracavidade, com mínimas perdas de inserção. Neste experimento, pulsos ópticos de largura temporal igual a 45 ps foram obtidos. Este modulador está sendo utilizado quotidianamente como ferramenta de laboratório na pesquisa do regime de travamento de modos em lasers contínuos de Nd.

Agradecemos à FINEP pelo apoio e à FAPESP pela bolsa de estudos de Mestrado concedida a Edison Puig

Maldonado (processo FAPESP 88/3676-1), que possibilitou a execução deste trabalho.

### Referência

1. L. Brillouin, Ann. Phys. (Paris), 9th ser., vol. 17, 88 (1922).
2. P. Debye and F. W. Sears, Proc. Nat. Academy of Science (USA), vol. 18, 409 (1932).
3. J. C. Slater, Rev. Mod. Phys., vol. 30, 197 (1958).
4. A. Korpel, *Acoust-Optics in Applied Optics and Optical Engineering*, R. Kingslake, Ed., vol VI, p.89, Academic Press (1980).
5. E. I. Gordon, Proc. IEEE, 54, n.10 (1966).
6. D. Maydan, IEEE J. Quant. Electron., QE-6, 15 (1970).
7. W. P. Mason, *Eletromechanical Transducers and Wave Filters*, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, (1942)
8. W. P. Mason, *Physical Acoustics and the Properties of Solids*, D. Van Nostrand Comp. Inc, Princeton, New Jersey (1958).
9. A. H. Meitzler, *Piezoelectric Transducer Materials and Techniques for Ultrasonic Devices Operating Above 100 MHz in Ultrasonic Transducer Materials*, O. E. Mattiat, Ed., Plenum Press, N.Y. (1971).
10. E. K. Sittig, IEEE Trans.Sonics Ultrason., SU-16, 2 (1969).
11. E. K. Sittig, IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-18, 231 (1971).
12. C. V. Raman, N. S. N. Nath, Proc. Indian Acad. Sci., 2A, 406 (1935); 3A, 75 (1936); 4A, 222 (1937).
13. M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press Inc., N.Y. (1959).
14. R. Adler, IEEE Spectrun, p. 42, 1967.
15. N. Uchida, N. Niizeki, Proc. IEEE, 61, 1073 (1973).
16. W. Koechner, *Solid State Laser Engineering*, Springer-Verlag, N.Y., 2nd. Ed. (1988).
17. A. Yariv, *Quantum Electronics*, John Wiley & Sons, Inc., 2nd. Ed. (1975).
18. E. P. Maldonado, J. E. C. Nogueira, N. D. Vieira Jr.; IEEE J. Q. Electr., QE-29, 1218 (1993).
19. Quantronix Acousto-Optic Q switcher, model 303.
20. Os blocos foram fornecidos pela empresa "FUN-BEC"
21. O cristal de quartzo foi crescido pela empresa "ABC X-tal"
22. O cristal de  $\text{LiNbO}_3$  foi fornecido pela empresa "Crystal Technology".
23. Utilizamos palha de aço da marca "Bom-Bril".
24. Projeto FINEP nº 5.2.82.0682.00 - Laser de Neodímio.
25. O bloco de sílica foi confeccionado nas Oficinas de Óptica do IFQSC-USP.
26. L. Turi, Cs. Kuti, F. Krausz, IEEE J.Q.Electr., QE-26, 1234 (1990).
27. E. P. Maldonado, I. M. Ranieri, N. D. Vieira Jr., S. P. Morato, S.P.; *Laser de Nd:YLF Bombeado Colinearmente por Laser de Argônio: Resumos estendidos do Grupo de Óptica do XVI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada - SBF* (1993).