

mentação é a mesma da experiência anterior.

Como se pretende comparar os efeitos das intensidades das correntes em ambos os circuitos, teremos que utilizar duas

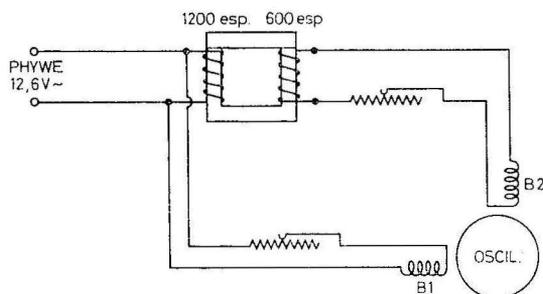


Fig. 32 — Montagem para o estudo do desfaseamento entre as intensidades das correntes, primária e secundária, num transformador.

bobinas,  $B1$  e  $B2$ , uma de eixo horizontal e outra de eixo vertical cujos campos magnéticos irão influenciar o feixe segundo direcções normais entre si. As resistências intercaladas nos circuitos permitem obter um sinal luminoso dentro dos limites do alvo.

Dando a devida atenção aos terminais das bobinas onde se deverão fazer as li-

gações, obtem-se um anel luminoso orientado segundo os quadrantes 2 e 4 do alvo. A intensidade da corrente no secundário está atrasada em relação à intensidade no primário, de um valor compreendido entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

#### 11.4. Desfasamento entre os valores da tensão e da intensidade da corrente no secundário.

A experiência, análoga às anteriores, consiste em ligar os terminais do primário (bobina de 1200 espiras) aos 12,6 V ~ da caixa *Phywe*, e os terminais do secundário às placas  $XX$ , por um lado, e por outro à bobina indutora cujo campo magnético irá influenciar o feixe electrónico, introduzindo neste circuito uma resistência de  $500 \Omega$ .

Obtem-se um anel luminoso orientado segundo os quadrantes 1 e 3 do alvo.

A intensidade da corrente no secundário está atrasada, em relação à tensão, de um valor compreendido entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . O atraso depende do valor da resistência de carga no circuito.

## O uso do laser em Telecomunicações

### MODULADORES ELECTROÓPTICOS

por M. A. R. P. DE BARROS

(Laboratório de Física da Faculdade de Ciências do Porto)

O uso do laser em telecomunicações vai gradualmente deixando o campo da ficção científica para se tornar realidade. Parece portanto oportuno este pequeno artigo onde se apresentam aos leitores de «Gazeta de Física» algumas considerações sobre moduladores. Maior relevo é inevitavelmente dado pelo autor ao modulador no desenvolvimento do qual trabalhou.

#### 1. Introdução

Desde sempre que um dos objectivos procurados em telecomunicações é uma grande capacidade de transmissão de informação<sup>(1)</sup>. Usando uma outra designa-

<sup>(1)</sup> Espera-se que uma ideia intuitiva do significado destes termos seja suficiente para compreensão do texto.

ção procura-se que os sistemas utilizados tenham uma grande largura de banda.

Como é evidente quanto maior for a frequência da onda portadora maior será a máxima largura de banda possível. No caso de se usarem radiações electromagnéticas a «luz» terá uma capacidade de transporte de informação muito mais elevada que as ondas de «rádio» convencionais. (A frequência de onda portadora num sistema de comunicação óptico é da ordem de  $10^{15}$  a  $10^{16}$  Hz; se a informação a transmitir tiver uma largura de banda de  $10^{12}$  Hz ocupa apenas 0.1% do espectro disponível).

As comunicações por via luminosa datam do tempo do homem das cavernas com os seus sinais de fumo. O uso de lanternas que acendem e apagam, tal como ainda hoje se pratica entre navios no alto mar, é uma versão mais recente do mesmo sistema.

Como naturalmente já ocorreu ao espírito do leitor este tipo de sistema de comunicações óptico nem de longe utiliza a capacidade de transmissão acima referida.

Foi o aparecimento do laser em 1960 [1] que veio revolucionar por completo as comunicações ópticas por permitir utilizar num grau muito mais elevado que até então a capacidade potencial dos feixes ópticos para transmissão de informação.

De facto, e ao contrário do que acontece por exemplo com uma lâmpada de vapor de mercúrio, a luz de um laser é monocromática<sup>(1)</sup> e além disso coerente, quer dizer, num dado ponto a onda luminosa está em fase consigo própria ao fim de um certo intervalo de tempo (coerência temporal) e num dado instante dois pontos da fonte luminosa estão em fase (coerência espacial).

A possibilidade de utilização de um feixe laser para comunicações depende<sup>(2)</sup> da existência de dispositivos que permitam imprimir neles a informação a trans-

mitir. Tais dispositivos são chamados *Moduladores* e é deles que nos vamos ocupar neste artigo.

## 2. Tipos de moduladores

A forma mais simples de modular será um interruptor que «acende» e «apaga» o feixe. Esse interruptor poderá ligar ou desligar o laser ou então estando este permanentemente ligado poderá permitir ou impedir a passagem do feixe.

Nesta modalidade de funcionamento há apenas dois estados possíveis que podemos designar por luz-escuridão, sim-não, ou um-zero.

Além deste tipo de funcionamento, digital, o modulador poderá ser do tipo analógico, i. e. a variação do feixe<sup>(3)</sup> faz-se dum modo contínuo.

Podemos classificar os moduladores de acordo com diversos critérios. Fundamentalmente podemos ter modulação interna e externa conforme o modulador faz ou não parte do laser. Uma das vantagens do uso de moduladores externos, no caso de sistemas digitais, é a possibilidade de com um único feixe termos diversos canais, cada um com o seu modulador, convenientemente multiplexados [2].

Quanto ao efeito físico utilizado poderemos classificar os moduladores em acustoópticos, electroópticos e magnetoópticos.

O efeito electroóptico, base do funcionamento dos moduladores a que especialmente nos referiremos, consiste essencialmente numa variação dos índices de

(1) A largura relativa da risca ( $\Delta\nu/\nu$ ) é  $10^{-7}$  para a luz duma lâmpada de sódio e  $10^{-11}$  para um laser de gás.

(2) Entre muitos outros factores evidentemente.

(3) Intencionalmente não se diz aqui o que é que varia.

refracção de um cristal quando a este é aplicado um campo eléctrico. A variação pode ser proporcional ao quadrado da amplitude do campo aplicado — efeito Kerr ou efeito electroóptico quadrático, descoberto por J. Kerr em 1875 — ou proporcional ao campo aplicado — efeito Pockels ou efeito electroóptico linear descoberto por F. Pockels em 1893.

componentes estavam em fase a diferença dos índices de refração vai em geral produzir uma diferença de fase entre ambas à saída. Como consequência o feixe passará de linear para elipticamente polarizado (fig. 1).

A aplicação de um campo eléctrico fará em geral variar as velocidades de fase, isto é, os índices de refração do

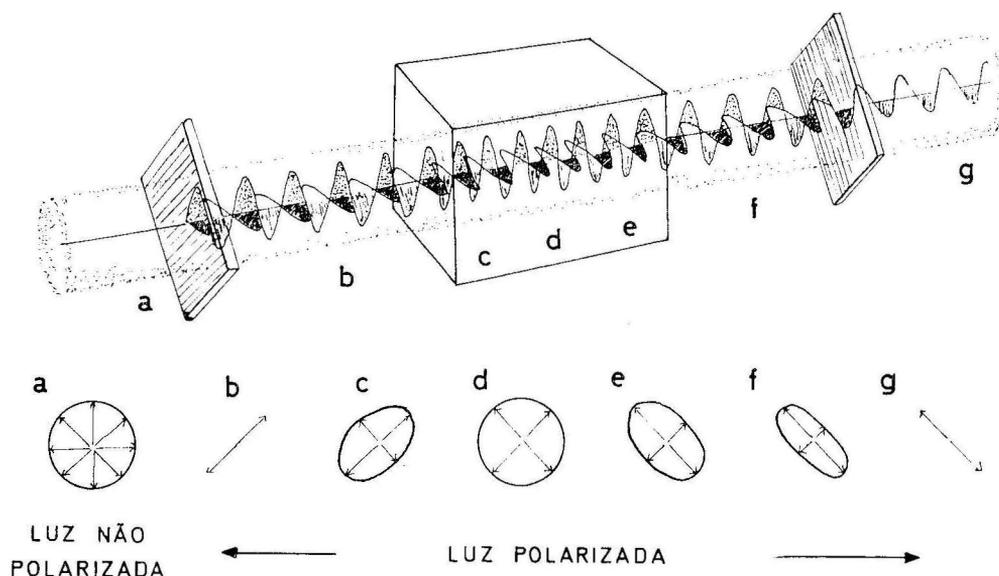


Fig. 1 — Polarização elíptica de um feixe de luz ao atravessar um cristal.

Para mais facilmente compreender o modo como funciona um modulador electroóptico vamos fazer uma ligeira referência às propriedades dos meios ópticamente anisotrópicos.

Consideremos um feixe luminoso linearmente polarizado que incide num cristal transparente.

Esse feixe vai decompor-se em dois, linearmente polarizados segundo direcções características do cristal (eixos do cristal) <sup>(1)</sup> ortogonais entre si. Em geral a cada uma dessas componentes corresponde um índice de refração ou, o que é mesmo, elas propagam-se com velocidades diferentes ( $v = \frac{c}{n}$ ). Se à entrada do cristal as duas

cristal, e poderá ou não fazer rodar as direcções de polarização no interior do cristal (mantendo o ângulo de 90° entre elas).

Sobre Óptica dos Cristais e Efeito Electroóptico muito haveria a dizer [3, 4] mas esperamos que o pouco que acima está exposto seja suficiente para compreender aquilo que se segue.

Os materiais electroópticos conhecidos há mais tempo e até há pouco os únicos

<sup>(1)</sup> Estamos implicitamente a admitir que a direcção de incidência é um dos eixos do cristal. Isto não vai restringir as validades das nossas conclusões uma vez que nos casos práticos considerados o feixe incidente está nessa situação.

usados em moduladores produzidos comercialmente são os do tipo ADP e KDP (respectivamente  $\text{NH}_4 \text{H}_2 \text{PO}_4$  e  $\text{KH}_2 \text{PO}_4$ ).

Recentemente materiais como o niobato de lítio,  $\text{LiNbO}_3$ , e tantalato de lítio,  $\text{LiTaO}_3$ , têm sido usados cada vez com mais sucesso.

Podemos ainda classificar os moduladores quanto à característica do feixe que é efectivamente modulada, por exemplo de amplitude, intensidade, fase, polarização.

Passamos agora a descrever alguns moduladores.

### 3. Modulador usando KDP

Descreveremos em primeiro lugar um modulador electroóptico convencional usando um cristal de KDP no modo longitudinal.

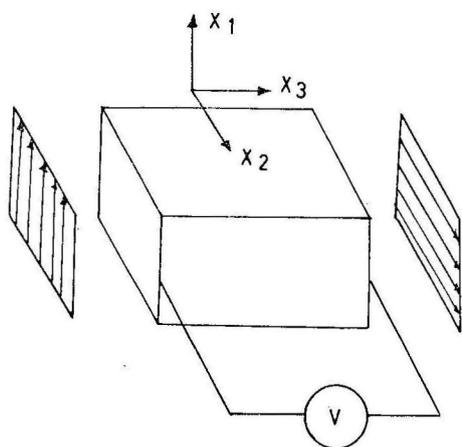


Fig. 2 — Modulador electroóptico de KDP.

Imaginemos um cristal de KDP com a luz propagando-se ao longo do eixo óptico do cristal (fig. 2).

Um polarizador de eixo vertical existente antes do cristal assegura que o feixe nele incidente seja verticalmente polarizado.

Como esta é uma das polarizações possíveis no interior do cristal o feixe

não sofre qualquer perturbação e sai pelo outro lado ainda verticalmente polarizado. Se agora tivermos um segundo polarizador com o eixo horizontal o feixe de luz é extinto.

Por meio de eléctrodos transparentes ou de eléctrodos em forma de coroa circular pode ser aplicado ao cristal um campo eléctrico paralelo à direcção de propagação do feixe luminoso (daí a designação de longitudinal para este modulador). Quando aos eléctrodos é aplicada uma tensão, para o cristal e orientação escolhidos, as direcções de polarização no interior do cristal rodam de  $45^\circ$  (qualquer que seja a tensão aplicada). Como além disso os índices de refração correspondentes às novas direcções são diferentes as duas componentes em que o feixe de entrada se decompõe têm fases diferentes à saída e o feixe resultante é portanto elipticamente polarizado.

Este modulador é portanto um modulador de fase. Para obtermos modulação de amplitude (ou de intensidade) <sup>(1)</sup> é que existe o segundo polarizador que apenas permite a passagem da componente horizontal do feixe.

Variando a tensão aplicada varia a diferença de fase entre as duas componentes i.e. a elipticidade do feixe, e portanto a intensidade do feixe que sai do analisador. Quando a diferença de fase entre as duas componentes é de  $\pi$  radianos a luz à saída do cristal é outra vez linearmente polarizada mas a  $90^\circ$  relativamente à direcção de entrada. Sendo assim em vez do zero que obtemos na ausência de tensão aplicada teremos um correspondente à passagem não atenuada do feixe. Entre estes dois valores extremos a intensidade do feixe variará continuamente segundo uma lei que não interessa aqui estar a determinar.

(1) A intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude.

A tensão necessária com KDP na orientação presente, para levar o feixe da extinção à transmissão completa é da ordem dos 8 kV e é independente do comprimento do cristal [5].

#### 4. Modulador usando $\text{LiTaO}_3$

Consideremos agora um segundo modulador, usando  $\text{LiTaO}_3$  conforme se representa na figura 3.

Para este material a aplicação de um campo eléctrico na direcção indicada não faz variar as direcções de polarização no interior do cristal de modo que agora

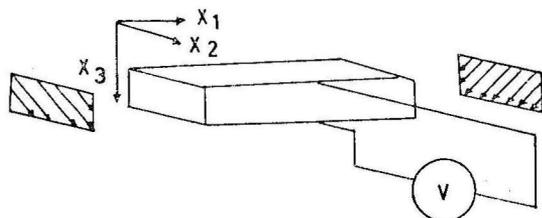


Fig. 3 — Modulador electroóptico de  $\text{LiTaO}_3$ .

colocamos o polarizador de entrada a  $45^\circ$  relativamente a essas direcções.

As duas ondas componentes vão propagar-se no interior do cristal com velocidades diferentes mesmo na ausência de qualquer campo eléctrico aplicado. Por esse motivo um segundo cristal, em geral uma cunha de quartzo, é introduzido no percurso do feixe para compensar esta diferença de fase de modo a obter à saída do cristal um feixe com as mesmas características do feixe incidente.

Se, tal como no caso anterior, houver um segundo polarizador a  $90^\circ$  relativamente ao primeiro o feixe será extinto.

A aplicação de uma tensão variará de modos diferentes os índices de refração e portanto produz uma diferença de fase entre as duas componentes à saída. Tal como no caso anterior é possível obter uma diferença de fase de  $\pi$  radianos de

modo que o feixe passe sem atenuação através do analisador.

Porém ao contrário do caso anterior a tensão necessária para passar de extinção a transmissão completa é agora função das dimensões do cristal.

Há um modulador construído segundo este princípio, usando  $\text{LiTaO}_3$ , nos Bell Telephone Laboratories [2]. Descreveremos em seguida, por terem bastante interesse, alguns pormenores práticos da sua construção que são algo diferentes das características gerais atrás indicadas.

Em primeiro lugar o cristal de  $\text{LiTaO}_3$ , 20 mm de comprimento por  $0,25 \times 0,25 \text{ mm}^2$  de secção, é espelhado numa das extremidades de modo que a luz efectua uma passagem dupla através do cristal. Por esse motivo para uma dada tensão aplicada a modulação obtida é dupla daquela que se obteria com uma passagem simples.

Como agora o feixe entra e sai do cristal segundo a mesma direcção torna-se impraticável o uso de um par polarizador-analisador para efectuar a conversão de modulação de fase em modulação de intensidade.

O feixe é polarizado num polarizador e passa em seguida, sem sofrer qualquer alteração num prisma de Rochon.

Quando a tensão aplicada produz à saída do cristal um feixe polarizado a  $90^\circ$  relativamente ao de entrada o prisma de Rochon deflecte o feixe para uma nova posição. Relativamente a esse ponto temos portanto a mesma situação que no caso anterior. Ausência de tensão aplicada *zero* uma vez que o feixe não vai lá ter, presença de tensão *um* (ver figura 4).

Finalmente tem interesse mencionar que devido à grande sensibilidade à temperatura da diferença de fase entre as duas componentes do feixe o cristal é conservado num forno com a temperatura variando menos de  $0,025^\circ\text{C}$ . Doutra modo o zero que se obtém na ausência de ten-

são transforma-se em um mesmo sem qualquer tensão aplicada.

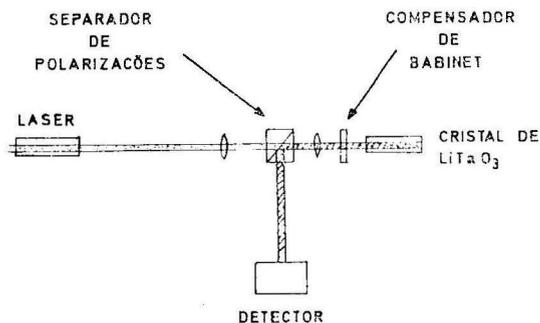


Fig. 4 — Dispositivo de modulação utilizando um cristal de LiTaO<sub>3</sub>.

Falta apenas dizer que para um cristal com 20 mm de comprimento e distância entre os eléctrodos 0,25 mm a tensão necessária para passar de extinção a transmissão completa é da ordem dos 30 Volts.

### 5. O modulador electroóptico por difracção (EODM)<sup>(1)</sup>

Conforme já foi dito atrás ambos os moduladores considerados são essencialmente moduladores de fase que o par polarizador-analisador converte em moduladores de intensidade<sup>(2)</sup>.

Seria interessante dispor de um modulador em que a modulação de intensidade se produzisse directamente num cristal electroóptico sem a intervenção de mais componentes. As vantagens seriam um sistema de ajustamento mais simples e além disso uma redução de atenuação introduzida pelo sistema na situação de transmissão completa<sup>(3)</sup>.

Em 1967 o professor E. A. Ash do University College London [6] propôs um novo tipo de modulador que satisfaz a a estes requisitos. Tem além disso as vantagens de necessitar de uma tensão e potência de funcionamento pequenas e grande velocidade de operação.

Consideremos um cristal electroóptico em forma de lâmina conforme é representado na figura 5.

Em cada uma das faces maiores do cristal é depositada uma estrutura interdigital de eléctrodos metálicos. Quando não há tensão aplicada aos eléctrodos e o feixe à entrada é linearmente polarizado segundo uma das duas direcções de vibração possíveis o feixe à saída tem a mesma polarização e, ignorando perdas no interior do cristal, a mesma intensidade.

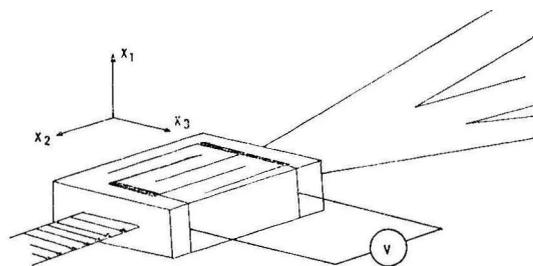


Fig. 5 — Modulador electroóptico por difracção.

Suponhamos agora que uma tensão é aplicada aos eléctrodos. No interior do cristal aparece um campo eléctrico (Fig. 6) espacialmente periódico. Na vizinhança

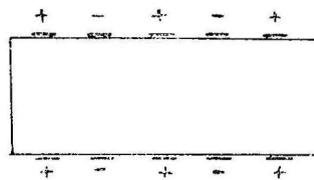


Fig. 6

do plano central do cristal o campo é muito aproximadamente horizontal devido à simetria do sistema de eléctrodos. Vamos

(1) EODM — Electro Optic Diffraction Modulator.

(2) Em rigor moduladores de amplitude. O uso de detectores sensíveis apenas à intensidade do feixe transforma-os para todos os efeitos em moduladores de intensidade.

(3) Insertion loss.

supor que o feixe do laser é focado de modo a propagar-se, no interior do cristal, na vizinhança do plano central. O campo eléctrico na região de interesse é responsável por uma variação do índice de refração aproximadamente sinusoidal em torno do valor estático. Se nós considerarmos agora o que acontece a uma onda que se propaga ao longo do cristal vemos que algumas «porções» da superfície de onda vão mais depressa e outras vão mais devagar. Em consequência disso a superfície de onda, que à entrada do cristal era plana, torna-se corrugada, e se admitirmos que a variação do índice de refração é sinusoidal a corrugação é também sinusoidal.

A consequência desta corrugação da frente de onda <sup>(1)</sup> é o aparecimento à saída do cristal de diversos feixes difractados separados por ângulos  $\theta = \frac{\lambda}{P}$  em que  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz e  $P$  o período da corrugação (ou da rede de eléctrodos o que é o mesmo). O aparecimento dos diversos feixes difractados vai diminuir a intensidade do feixe central. Fazendo variar a tensão aplicada deverá ser possível extinguir por completo o feixe central colocando toda a energia luminosa nos feixes laterais. Este é o fim que nos tínhamos proposto alcançar.

Para que tudo se passe como está descrito acima é essencial que o feixe luminoso se mantenha linearmente polarizado ao longo de todo o percurso no interior do cristal. O mesmo é que dizer as direcções de polarização no interior do cristal não devem ser alteradas pela aplicação do campo eléctrico. Esta condição impõe certas restrições na classe cristalográfica do material a utilizar.

Um dos materiais compatíveis com a condição acima é o niobato de lítio,  $\text{LiNbO}_3$ , que foi o escolhido por ser aquele dos facilmente obtíveis em que o efeito electroóptico era mais pronunciado.

Com tantalato de lítio dever-se-iam conseguir resultados substancialmente iguais mas em Inglaterra não era fácil obtê-lo.

As experiências realizadas com o primeiro modulador construído indicaram que a modulação era possível embora a «performance» fosse relativamente modesta essencialmente devido à elevada espessura do cristal (0.4 mm!). Um novo exemplar foi construído com cerca de  $180\mu\text{m}$  de espessura sendo os resultados obtidos bastante encorajadores.

Para remover por completo a luz do feixe central são necessários 25 V apenas obtendo-se um coeficiente de extinção (razão entre a luz total e a luz transmitida em extinção) de 25 dB <sup>(2)</sup>.

A figura 7 mostra o perfil do feixe para diversos valores da tensão aplicada.

Para traçar estes gráficos aplica-se ao cristal a tensão desejada e faz-se deslocar através do feixe um fotodiodo que é movido por um pequeno motor. O motor actua também sobre um potenciómetro do qual é derivado um sinal relacionado com a posição do fotodiodo. Este sinal e aquele do próprio fotodiodo são aplicados respectivamente aos braços  $x$  e  $y$  de um traçador de gráficos.

Outras curvas que importa conhecer, e que são obtidas por um processo análogo, são as que relacionam a intensidade luminosa com a tensão aplicada para os diferentes feixes. O resultado está representado na figura 8.

As curvas da figura 7 são importantes para se conhecer a distribuição espacial dos feixes (verificando assim a relação  $\theta = \frac{\lambda}{P}$ ) e dum modo imediato poder comparar entre si as suas intensidades.

(1) Já em 1896 o problema havia sido estudado por Lord Rayleigh para ondas acústicas.

(2)  $1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \log \frac{P_1}{P_2}$ .

As curvas da figura 8 em especial a que se refere ao feixe central, permitem analisar o funcionamento do modulador

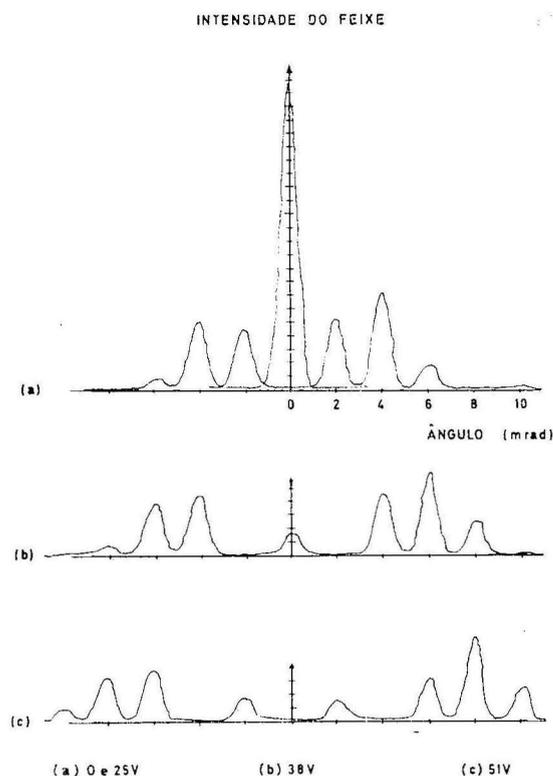


Fig. 7 — Perfil do feixe para diversos valores da tensão aplicada a um EODM.

e principalmente dimensionar novos aparelhos. Este segundo propósito é facilitado pelo facto de entre o máximo e o primeiro zero a curva da figura 8 (a) ser muito aproximadamente representada por uma função de Bessel  $J_0^2$ . É por este motivo possível determinar a tensão de extinção em função das características geométricas do modulador. É igualmente possível saber qual a percentagem de luz transmitida para um dado valor da tensão aplicada sem a necessidade de traçar a curva.

É interessante prever qual será a forma de onda modulada que se obtém quando ao modulador é aplicada uma tensão sinusoidal. Uma vez que no que respeita à

intensidade do feixe tudo se passa do mesmo modo quer a tensão aplicada seja positiva ou negativa aquilo que se passa no primeiro meio período da tensão modulante repete-se no segundo meio período. Como consequência o feixe vai aparecer modulado a uma frequência dupla da aplicada. A forma de onda propriamente dita depende da amplitude da tensão modulante. Se esta for inferior à tensão de extinção a onda modulada é muito aproximadamente sinusoidal. Se a ultrapassar aparece uma «corcova» devido ao reaparecimento de luz no feixe central. Conforme novas tensões de extinção sejam atingidas teremos «complicações» adicionais na forma de onda. O que se passa está documentado nos oscilogramas da figura 9.

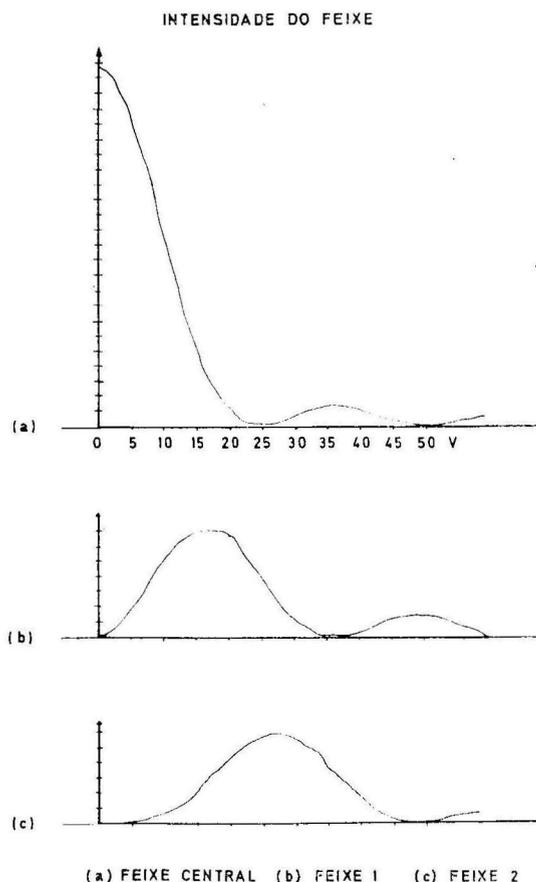


Fig. 8 — Característica de transferência de um EODM.

Ocorre neste momento perguntar se é possível evitar este efeito de duplicação da frequência de modo a usar o EODM como modulador analógico.

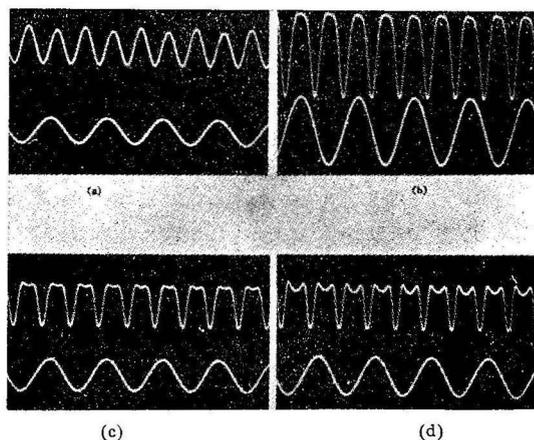


Fig. 9 — Variação da forma de onda com a amplitude de modulação. Traço inferior: tensão de modulação; traço superior: modulação do feixe de luz. Tensão de modulação crescente de 20 a 70 Volt pico a pico.

Imaginemos que aplicamos ao cristal uma tensão contínua aproximadamente igual a metade da tensão de extinção. Se sobrepusermos a esta um sinal sinusoidal que na sua excursão não ultrapasse os extremos da curva o efeito de duplicação da frequência desaparece. Se além disso tivermos o cuidado de restringir essa excursão à parte «rectilínea» da característica o sinal modulado obtido é, a menos de uma distorção muito pequena, igual ao aplicado. A figura 10 comprova esta afirmação (distorção total observada  $\ll 3\%$ ).

É evidente por outro lado, que o preço a pagar por este melhoramento é uma redução da profundidade de modulação<sup>(1)</sup> que passa de 95% para 65%.

Fizeram-se também experiências com modulação por impulsos uma vez que esta parece ser a forma de transição a usar no futuro. Uma das vantagens do uso de impulsos é a maior resistência ao

aparecimento de «ruído» (noise) no feixe óptico ao longo do seu percurso. Desde que os impulsos tenham uma amplitude suficiente é relativamente simples distinguir entre presença ou ausência de impulso. Outra vantagem é a possibilidade de usar o mesmo feixe para transmitir diversos canais de informação desde que o tempo que medeia entre dois impulsos consecutivos seja muito maior que a duração de um impulso. Quanto aos impulsos procura-se que sejam tão aguçados quanto possível, isto é, que tenham tempos de subida e descida pequenos e ainda pequena largura<sup>(2)</sup>.

Com o EODM conseguiram-se tempos de subida da ordem do nano-segundo conforme a figura 11<sup>2a</sup> mostra. É possível

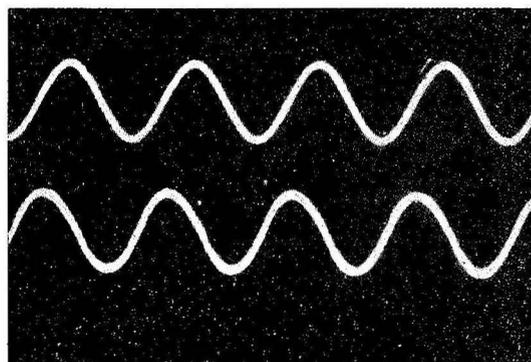


Fig. 10 — Funcionamento linear do EODM.

melhorar ainda estes valores e na realidade algo se conseguiu já nesse sentido. Não vamos no entanto entrar em pormenores a esse respeito.

Além de requerer uma tensão baixa para funcionar, a potência necessária é também reduzida. Uma outra vantagem, relativamente ao modulador descrito no

(1) Razão entre a amplitude da onda modulada e a da onda portadora não perturbada.

(2) Tempo de subida — intervalo de tempo entre 10% e 90% da amplitude total no começo do impulso; Tempo de descida — idem no fim do impulso. A largura do impulso é usualmente medida a meia altura.

número 4. é que o EODM é praticamente independente de variações de temperatura. Isto deve-se ao facto de que ao contrário daquele no EODM apenas uma das

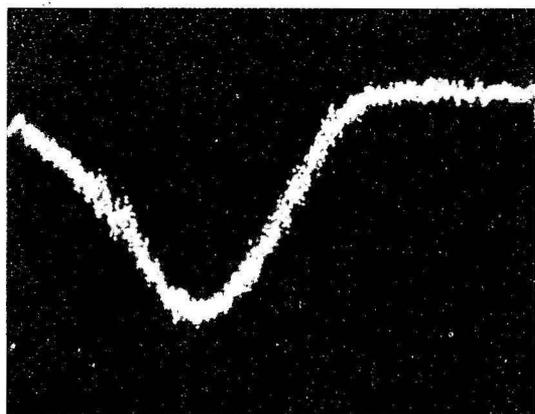


Fig. 11 — Resposta do modulador electroóptico a um impulso rápido. Tempo de subida cerca de 1 ns.

polarizações intervém. Experiências realizadas com esse propósito mostraram que uma variação brusca de 10°C da temperatura do cristal quasi não afectava o coeficiente de extinção.

QUADRO I

Material usado	LiTaO <sub>3</sub>	LiNbO <sub>3</sub>	DKDP	LiNbO <sub>3</sub>
Coefficiente de extinção dB	20		14	25
Tensão de extinção	30	800	45	25
Profundidade de modulação %		64	100	95
Potência mW/MHz	2.5	1800	60	7.6
Tempo de subida, ns	~1.5	10	10	1
Referência	2	9	10	EODM

Para se ter uma ideia das possibilidades do EODM quando comparado com outros moduladores recentes semelhantes basta consultar o quadro I.

Indicações pormenorizadas sobre a teoria do funcionamento e resultados experimentais podem ser encontradas nas referências [7] e [8].

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. JAVAN, W. R. BENNET JR., D. R. HERRIOT, *Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a helium-neon mixture*, Phys. Rev. Lett., **6**, 106-110, 1961.
- [2] R. T. DENTON, T. S. KINSEL, *Terminals for a High-Speed Optical PCM Communication System, I/II. 224 Mbit/s Single Channel Optical Multiplexing and Demultiplexing* Proc. IEEE, **56**, 140-5/146-54, 1968.
- [3] M. BORN and E. WOLF, *Principles of Optics*, Pergamon Press 1959 Chapter XIV.
- [4] J. F. NYE, *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, 1967.
- [5] A. YARIV, *Quantum Electronics*, John Wiley and Sons Inc. New York, 1967.
- [6] J. F. ST-LEDGER, E. A. ASH, *Laser Beam Modulation using Grating Diffraction Effects*, Electronics Lett. **4**, 99-100, 1968.
- [7] M. A. R. P. de BARROS, M. G. F. WILSON, *Nanosecond Baseband Optical Diffraction Modulator*, Electronics Lett., **7**, 267-269, 1971.
- [8] ———, *High Speed Electro-optic Diffraction Modulator for Baseband Operation*, Proc. IEE, **119**, 807-814, 1972.
- [9] J. M. HAMMER, *Digital Electrooptic Grating Deflector and Modulator*, Appl. Phys. Lett. **18**, 147-9, 1971.
- [10] W. J. RATTMAN, W. E. BICKNELL, B. K. YAPP, C. I. PETERS, *Broadband Low Drive-power Electrooptic Modulator*, IEEE J. Quantum Electron., **QE-3**, 550-4, 1967.