

## Efeitos óticos

# Estudo do efeito eletro-ótico com recurso a técnicas de interferometria

Cristina Alexandra Furtado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Física

20 de novembro de 2017

**Abstract**— Nesta execução experimental estudou-se o efeito eletro-ótico numa amostra de niobato de lítio por intermédio de interferómetros de Michelson e Mach-Zehnder. Verificou-se que, perante a aplicação de uma tensão na amostra, o padrão de interferência desloca-se, tratando-se de um fenómeno resultante da alteração do índice de refração do material. Mostrou-se que a intensidade das franjas detetada por um fotodetector varia com a tensão aplicada, de acordo com uma função sinusoidal, tal como o previsto pelas relações de interferência. A partir dos resultados obtidos, determinou-se, ainda, o coeficiente  $r_{33}$  relativo ao tensor eletro-ótico do material, com erros de 31,8% para o interferómetro de Michelson e de 6,9% para o interferómetro de Mach-Zehnder.

## I. INTRODUÇÃO

### A. Efeito eletro-ótico

O efeito eletro-ótico verifica-se quando as propriedades óticas de um material são alteradas perante a aplicação de um campo elétrico externo. Estas alterações, em particular o índice de refração (pelo tensor de permissividade, uma vez que  $\epsilon_r = n^2$ ), permitem alterar parâmetros da onda, como o caso da sua polarização, permitindo, também, tornar um meio isotrópico num meio anisotrópico.

Pelo estudo da propagação da luz em cristais, define-se equação do elipsóide de índices, em função das coordenadas principais, como

$$\frac{x}{n_x^2} + \frac{y}{n_y^2} + \frac{z}{n_z^2} = 1$$

onde  $n_i$  corresponde ao índice que a onda vê na direção  $i$ . Quando se considera um cristal anisotrópico uniaxial,  $n_x = n_y = n_o$  (índice ordinário) e  $n_z = n_e$  (índice extraordinário). Quando o cristal é isotrópico,  $n_x = n_y = n_z = n$ .

A aplicação de um campo elétrico no material provoca redistribuição das cargas no interior do cristal, conduzindo a alterações no tamanho e na orientação do elipsóide de índices. Quando a alteração no índice de refração é proporcional ao campo, obtém-se o efeito eletro-ótico linear (efeito de Pockels). Caso o índice dependa do quadrado do campo, o efeito diz-se quadrático (efeito de Kerr).

De notar que, considerando um cristal anisotrópico uniaxial, existem, para um dada direção de propagação, duas ondas (ordinária e extraordinária) com índice de refração e direção de polarização próprios – fenómeno de birrefringência.

Expimindo o índice em função do campo elétrico aplicado por uma expansão em série de Taylor, obtém-se a seguinte expressão:

$$n(E) \approx n_0 + n_1 \cdot E + n_2 \cdot E^2$$

Considerando, apenas, o efeito de Pockels, o termo de segunda ordem do campo é desprezado e a dependência é linear (a birrefringência induzida no material é proporcional ao campo). Note-se que este efeito ocorre para cristais sem centro de simetria e que geralmente têm propriedades óticas que dependem da temperatura e do comprimento de onda da luz.

A intensidade das franjas do padrão de interferência pode ser descrita pela relação

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos(\Delta\phi + \phi_0)$$

onde  $I_i$  corresponde à intensidade do raio que percorre o braço  $i$ ,  $\Delta\phi$  corresponde à diferença de fase entre as duas ondas, encontrando-se linearmente relacionado com  $\Delta n$  e  $\phi_0$  corresponde a uma fase inicial. Conhecida a relação entre a intensidade e o campo aplicado no material, determina-se o comportamento da birrefringência.

Nesta execução experimental pretende-se verificar a ocorrência de efeito eletro-ótico numa amostra de niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ), que tem uma estrutura trigonal e que, para  $\lambda = 633\text{nm}$ , é caracterizado pelos índices de refração  $n_o = 2,2866$  e  $n_e = 2,2028$  (cristal uniaxial negativo). O material é naturalmente birrefringente, mas sofre alterações nesse aspeto devido ao efeito enunciado.

O tensor eletro-ótico do niobato de lítio pode ser escrito como

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Quando se considera a aplicação de um campo elétrico na amostra cuja direção é paralela ao seu eixo ótico (seja  $z$ ), o comprimento dos semi-eixos do elipsóide de índices tomam os novos valores

$$n_x = n_y \approx n_o \cdot \frac{1}{2} r_{13} n_o^3 \cdot E$$

$$n_z \approx n_e \cdot \frac{1}{2} r_{33} n_e^3 \cdot E$$

pelo que o cristal mantém a sua configuração uniaxial, embora os índices se alterem. Para uma onda eletromagnética linearmente polarizada segundo o eixo ótico, a diferença de fase introduzida pela ação do campo é dada por

$$\Delta\phi(E) = \frac{\pi L n_e^3 r_{33} E}{\lambda}$$

onde L é o comprimento da amostra utilizada. Para que a diferença de fase da onda seja de  $\pi$ , a tensão a aplicar no material tem o valor

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{L n_e^3 r_{33}}$$

onde d corresponde à espessura da amostra. O coeficiente  $r_{33}$  tem o valor teórico de  $30,9 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ .

### B. Interferómetro de Michelson

O princípio de funcionamento do interferómetro de Michelson é o seguinte: um feixe laser é incidente num prisma que funciona como um *beam-splitter*, dividindo o feixe em dois raios que se propagam separadamente por dois braços. No extremo de cada braço encontra-se um espelho que reflete o respetivo raio de volta ao prisma, ocorrendo recombinação dos dois raios. A partir do raio obtido, é possível observar o padrão de interferência.

O padrão observado é consequência da diferença de caminho ótico percorrido pelos dois raios. Posto isto, à medida que, por exemplo, o comprimento de um dos braços varia, uma diferença de fase é introduzida no raio correspondente, levando à alteração da disposição das franjas de interferência.

Nesta execução experimental, os dois braços mantêm sempre o mesmo comprimento. No entanto, é introduzida uma amostra do material em estudo num dos braços, que conduz a uma diferença de fase dada pela seguinte relação

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot 2\ell$$

onde  $\ell$  é o comprimento da amostra,  $\lambda$  é o comprimento de onda do feixe incidente e  $\Delta n$  é a birrefringência do material,  $n_e - n_o$ , que varia com o campo elétrico aplicado.

### C. Interferómetro de Mach-Zehnder

O interferómetro de Mach-Zehnder tem um princípio de funcionamento em parte semelhante ao de Michelson, mas com uma subtilidade: o espelho no extremo de cada braço orienta o respetivo raio para um segundo prisma introduzido na montagem, onde os raios são recombinados. Desta feita, cada raio não percorre o mesmo percurso por duas vezes, pelo que a diferença de fase será

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot \ell.$$

A partir deste resultado pode-se concluir que, à luz do estudo em questão, é necessário aplicar o dobro da tensão, comparativamente ao interferómetro de Michelson, para que se obtenha a mesma diferença de potencial e, por conseguinte, o mesmo valor de birrefringência.

De notar que a principal vantagem do uso desta montagem prende-se com o facto de não existir introdução de ruído resultante de reflexões no primeiro prisma.

## II. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Cada um dos interferómetros foi montado numa mesa ótica, recorrendo a processos de esquadria para o alinhamento do sistema (os raios emergentes da recombinação no *beam-splitter* devem coincidir espacialmente um com o outro em qualquer ponto). Trata-se de um processo particularmente exigente, uma vez que é necessário manter um balanço equilibrado entre a rotação e a translação dos espelhos.

Nas configurações dos interferómetros incluíram-se, ainda, filtros óticos, de modo a manter uma igualdade de potência nos braços dos interferómetros, melhorando a resolução do padrão de interferência observado.

O sinal registado pelo fotodetetor foi observado com recurso a um osciloscópio, a partir do qual se retiraram os valores da intensidade.

O feixe laser utilizado encontrava-se polarizado paralelamente ao campo aplicado na amostra, que, por sua vez, se encontrava paralelo ao eixo ótico do material. Posto isto, a análise segue as condições teóricas anteriormente descritas (nestas condições, é o índice extraordinário,  $n_e$ , que sofre variações no seu valor).

## III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### A. Interferómetro de Michelson

Para a montagem em questão, obtiveram-se os resultados representados na figura seguinte.

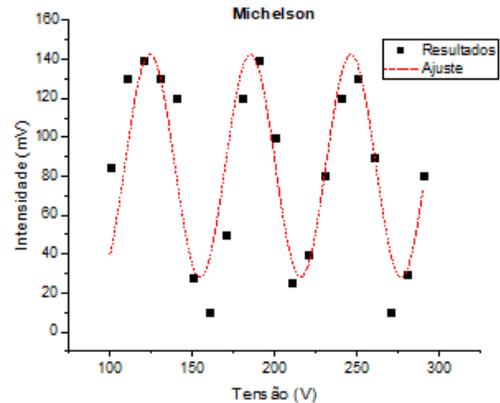


Fig. 1. Comportamento da intensidade das franjas detetada no fotodetetor em função da tensão aplicada no material. De notar que pode ser ajustada por uma curva sinusoidal (ajuste do Origin).

$I_0$	$85,24009 \pm 5,28555$
$c$	$47,7068 \pm 3,3941$
$w$	$30,55392 \pm 0,64836$
$A$	$57,0224 \pm 7,5263$
$R^2$	0,7824

Tabela 1. Parâmetros do ajuste pela função  $I = I_0 + A \sin(\pi \cdot (V-c)/w)$ .

Pela análise do gráfico, é imediato concluir que as franjas do padrão de interferência se movem consoante a aplicação da tensão na amostra. Isto indica que existe uma alteração na diferença de fase que, neste *setup*, só pode ser introduzida pelo facto do índice de refração da amostra variar com o campo, por um coeficiente associado à birrefringência,  $\Delta n$ .

Embora os resultados se assemelhem a uma curva sinusoidal, é evidente que a configuração utilizada introduz oscilações nesses valores (comprovado pelo  $R^2$  do ajuste), o que se justifica com o facto do interferómetro de Michelson ser muito suscetível a alterações externas. Nesta situação, inclusivé, o fotodetector encontrava-se numa localização em que era facilmente influenciado por pequenos movimentos (como o fechar de uma porta ou o variar da tensão manualmente por um dos elementos do grupo).

### B. Interferómetro de Mach-Zehnder

Comparativamente ao caso anterior, nesta parte experimental aplicaram-se tensões mais elevadas, fruto da sua execução numa situação distinta. Para além disso, o fotodetector aqui utilizado permitia configurar o ganho que se pretendia no sinal do osciloscópio. Os resultados obtidos estão representados na figura que se segue.

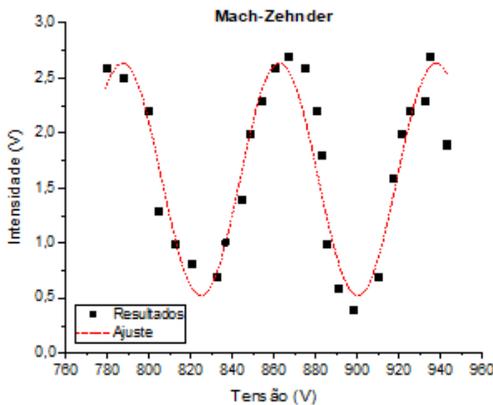


Fig. 2. Variação da intensidade registada no fotodetector em função da tensão aplicada no material.

$I_0$	$1,56132 \pm 0,06159$
$c$	$90,2729 \pm 16,2642$
$w$	$37,66973 \pm 0,78595$
$A$	$1,05496 \pm 0,08967$
$R^2$	0,87117

Tabela 2. Parâmetros do ajuste pela função  $I = I_0 + A \sin(\pi \cdot (V-c)/w)$ .

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o período da curva é superior quando comparado com o caso do interferómetro de

Michelson, tal como era esperado pelas considerações teóricas.

De notar que, tal como no caso anterior, o sistema é muito sensível, revelando oscilações. O feixe laser utilizado também apresentava algum ruído que era evidente no sinal obtido no osciloscópio.

### C. Efeito de Pockels

A partir dos resultados obtidos e das dimensões da amostra ( $L = 4,76\text{cm}$  e  $d = 1\text{mm}$ ), é possível obter o valor experimental do coeficiente  $r_{33}$ . Conhecidos os pontos de máximo e de mínimo dos ajustes de dados para ambos os interferómetros, é possível fazer a reta que descreve o comportamento da tensão desses picos em função da diferença de fase que lhes corresponde.

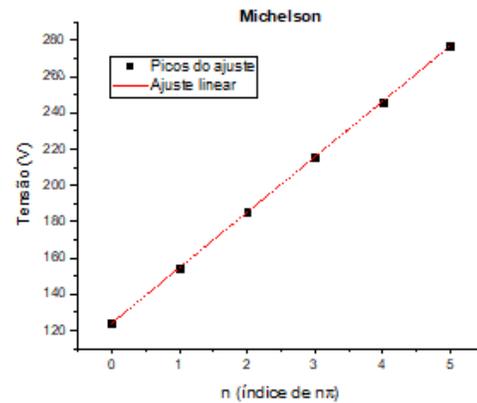


Fig. 3. Cada pico do ajuste corresponde a um valor de diferença de fase. Os máximos correspondem a múltiplos pares de  $\pi$ , enquanto os mínimos correspondem a termos ímpares.

Do ajuste linear dos pontos resulta um declive de  $V_\pi = 30,54998 \pm 0,01472$ . Para a amostra, obtém-se o coeficiente  $r_{33} = (40,72496 \pm 0,01962) \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ . Comparando com o valor teórico, o erro é de 31,8%.

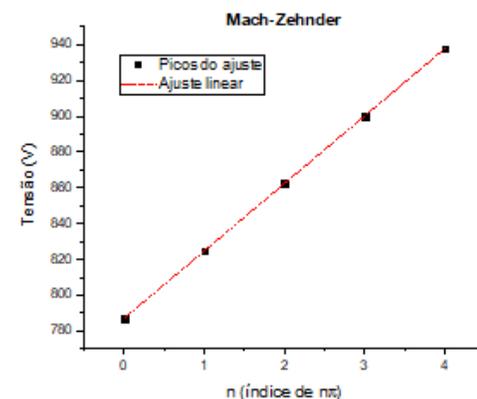


Fig. 4. Ajuste linear dos picos em função da diferença de fase.

O declive da reta tem o valor  $V_\pi = 37,67567 \pm 0,01642$ , que resulta num coeficiente  $r_{33} = (33,02255 \pm 0,01439) \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ . O erro associado é de 6,9%.

## IV. CONCLUSÃO

Esta experiência permitiu verificar o efeito eletro-ótico numa amostra de niobato de lítio, recorrendo às montagens dos interferómetros de Michelson e de Mach-Zehnder. Observou-se que a diferença de caminho ótico introduzida e, conseqüentemente, a diferença de fase entre as duas ondas propagantes encontrava-se proporcionalmente relacionada com o termo de birrefringência induzido no material pela aplicação de um campo elétrico externo, uma vez que todas as restantes variáveis (como o comprimento dos braços) foram sempre mantidas constantes, não provocando qualquer alteração na diferença de fase.

Ao fazer variar a tensão aplicada no material, obteve-se a curva que descrevia a variação da intensidade detetada. Essa curva pode ser descrita por uma função sinusoidal, seguindo o esperado teoricamente. Observando diretamente o padrão de interferência, também se verificou que as franjas se deslocavam sempre que o valor da tensão se alterava.

A partir da curva de ajuste experimental, determinou-se o valor do coeficiente  $r_{33}$ , obtido do declive da reta que une os pontos do gráfico de picos de intensidade em função do índice do múltiplo de  $\pi$  correspondente. Para os dados do interferómetro de Michelson, o valor obtido foi  $r_{33} = (40,72496 \pm 0,01962) \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ , sendo o erro de 31,8%. Já para o interferómetro de Mach-Zehnder,  $r_{33} = (33,02255 \pm 0,01439) \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ , com erro de 6,9%. O erro no primeiro caso é muito elevado, mas tal pode-se justificar com o próprio ajuste ter um  $R^2$  baixo, resultante dos pontos experimentais serem um pouco dispersos.

Numa perspetiva geral, os objetivos da execução experimental foram cumpridos. No entanto, os interferómetros são estruturas muito sensíveis a alterações externas, introduzindo oscilações indesejadas, como se pode verificar pelas curvas de intensidade obtidas. Ter um dispositivo que variasse a tensão de forma contínua e o isolamento da configuração experimental (por exemplo, com uma caixa de esferovite) são medidas que poderiam minimizar essas oscilações.

## REFERÊNCIAS

- Almeida J M M M (1991), "Determinação dos coeficientes electroópticos do niobato de lítio", Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
<http://opt.zju.edu.cn/zjuopt2/upload/resources/chapter18%20Electro-Optics.pdf>  
[http://faculty.wiu.edu/P-Wang/Physics\\_570\\_Spring\\_2016/Lab%20Manuals/Lab%206\\_Electro-optic%20Effect.pdf](http://faculty.wiu.edu/P-Wang/Physics_570_Spring_2016/Lab%20Manuals/Lab%206_Electro-optic%20Effect.pdf)