

Efeito Faraday

Introdução

Se um corpo sólido ou líquido transparente é colocado num campo magnético uniforme e um feixe de luz plano-polarizado passa através desse corpo na direção paralela às linhas de campo magnético (através de furos nas peças polares de um eletroímã) encontra-se que a luz transmitida é ainda plano-polarizada, mas o plano de polarização é girado por um ângulo proporcional à intensidade do campo. Esta "rotação ótica" é denominada de efeito Faraday. A direção da rotação ótica, como é vista quando se observa dentro do feixe, é revertida quando a luz que atravessa a substância se propaga numa direção oposta ao campo magnético, isto é, a rotação do plano de polarização pode ser revertida mudando a direção do campo ou a direção da luz. A luz refletida que tinha passado sofre uma rotação de duas vezes o ângulo observado para o caso de uma transmissão simples.

Colocando a amostra entre dois polarizadores (ou prismas de Nicol), de maneira que a luz não seja transmitida através de uma direção, mas que pode passar com certa intensidade na direção oposta. O efeito é único neste aspecto: permite a construção de um instrumento ótico irreversível em que o observador A de um lado pode ver o observador B do *outro* lado, mas o observador A não pode ser visto por B.

Esse efeito difere em um aspecto importante de um efeito similar, denominado atividade ótica, que ocorre em soluções sacarosas; nesse caso a rotação ótica, que ocorre em soluções sacarosas; nesse caso a rotação ótica procede na mesma direção da luz. Em particular, quando um feixe de luz é retro-refletido através da solução, este sai com a mesma polarização com que entrou antes da reflexão.

Rotação ótica e birrefringência circular

A rotação ótica pode ser vista em termos de birrefringência circular. Este último termo significa que a velocidade de propagação da luz polarizada circular à direita difere da esquerda. Notar que numa birrefringência "linear" ordinária, a velocidade de propagação de uma onda linearmente polarizada depende do ângulo entre a direção da polarização e o eixo ótico do material (4). Em ambos os casos o material deve ser anisotrópico, mas no caso linear a anisotropia está na estrutura do cristal, enquanto que no efeito Faraday um material previamente isotrópico fica anisotrópico pela aplicação de um campo magnético.

A figura 1 mostra como a birrefringência circular pode produzir uma rotação ótica. A luz linearmente polarizada na direção z e propagando-se na direção y , incide sobre o plano A . A luz pode ser representada como sendo a soma vetorial de duas componentes circularmente polarizadas. Os vetores que representam os campos destas componentes no plano A estão mostrados em t_0 (quando nossas observações se iniciam) e em dois tempos posteriores t_1 , t_2 . O lado direito da figura mostra a luz que emerge da substância no plano B nos tempos correspondentes, isto é $t'_1 = t_1 + D/v$, onde $D_B = Y - Y_A$ e a rotação de E_l é um múltiplo de 2π , neste exemplo.

Com esta definição para tempos correspondentes, o vetor de polarização que gira para a luz polarizada à esquerda em B , está sempre em fase com o tempo correspondente no plano A . Se a luz polarizada à direita se propaga mais lentamente através do meio, seu vetor \hat{E}_r , ficará atrasado e fora de fase com E_l por um ângulo θ . Geometricamente, desde que os vetores E_r estão girando no sentido

horário com frequência angular ω , significa que no plano B, $\vec{E}_r(t'')$ estará sempre com um ângulo θ (anti-horário) com respeito a $E(t)$ no plano A.

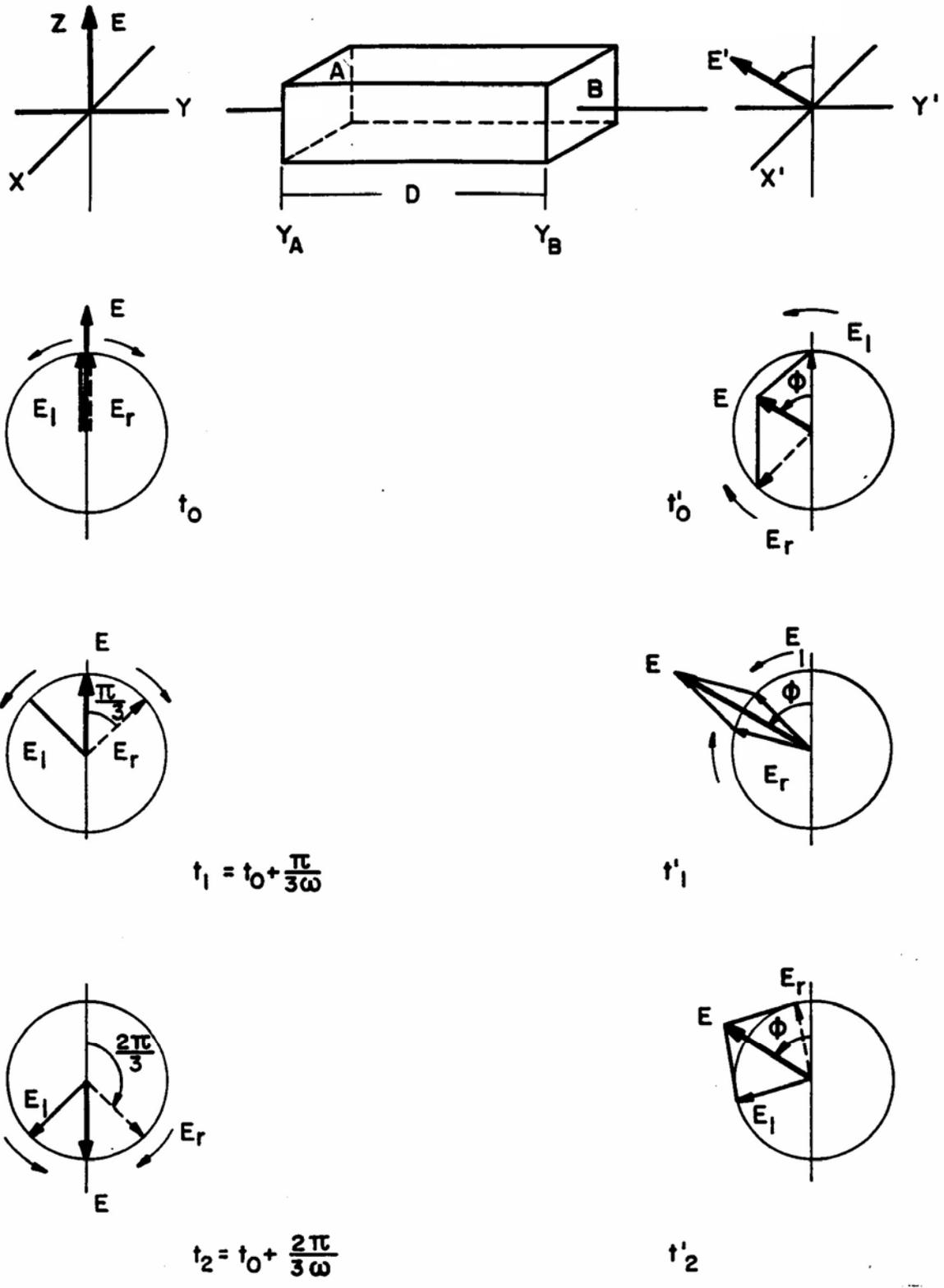


Figura 1: Rotação Ótica num meio pelo efeito Faraday. O sub-índice r = direita e l = esquerda.

Então θ está dado por

$$\theta = \omega (\text{tempo à direita} - \text{tempo à esquerda})$$

$$\begin{aligned} &= \omega \left(\frac{D}{V_{\text{direita}}} - \frac{D}{V_{\text{esquerda}}} \right) \\ &= \frac{\omega D}{c} (n_r - n_l) \end{aligned} \quad (1)$$

Onde n é o índice de refração.

O campo resultante $\vec{E} = \vec{E}_l + \vec{E}_r$ faz um ângulo $\theta/2$ com o eixo z , e se $n_r > n_l$, o plano de polarização de E gira no sentido anti-horário (todas as observações são feitas olhando para dentro do feixe que se aproxima ao observador). O ângulo de rotação está dado por

$$\theta = \frac{\theta}{2} = \frac{\omega D}{2c} (n_r - n_l) \quad (2)$$

Assim, podem ser consideradas diferentes velocidades de propagação para componentes circulares à direita e esquerda para a rotação observada no efeito Faraday.

Para amostras isotrópicas colocadas num campo magnético a rotação do plano de polarização é proporcional à magnitude do campo e ao comprimento da amostra.

$$\theta = V(\lambda, T) B \cdot D \quad (3)$$

Onde V é denominada de constante de Verdet, que depende do comprimento de onda λ e da temperatura T , $C(\lambda, T)$ está relacionada ao índice de refração $n(\lambda)$.

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (4)$$

Valores típicos da constante de Verdet são dados no fim da apostila (ver também a referência 2).

Este efeito possui algumas aplicações na física moderna a medida que podemos modular a intensidade do feixe de luz de acordo com um sinal elétrico. Já foi utilizado para estimar o campo magnético no espaço e para medir corrente contínua muito grande.

Aparelhagem

- 1 eletroímã Ealing com fonte de alimentação (I=5A) ou similar
- 1 gausímetro ou sonda de Hall
- 3 ou 4 laser He-Ne diferentes comprimentos de onda
- 2 polarizadores lineares com suportes graduados
- 2 obturadores circulares
- 1 fotocélula

1 voltímetro Keythley 160 B

Amostras de vidro flint

Banco ótico, suportes

Nesta experiência mediremos a constante de Verdet em amostras de vidro flint para três comprimentos de onda diferentes.

Experiência 1 - Calibração do Campo Magnético

Ajuste a separação entre os pólos do ímã de tal maneira que as amostras encham todo o espaço entre os pólos.

Ligar a fonte do ímã e medir o campo magnético com o gaussímetro ou sonda de Hall para valores da corrente entre 0 e 5 A.

Desde que o campo magnético não é muito uniforme, através do espaço entre as peças polares, é conveniente tomar medidas do campo para várias posições. Faça um gráfico B vs I para diferentes posições da sonda no espaço entre as peças polares e calcule a intensidade do campo magnético médio vs corrente. Faça o gráfico do campo magnético médio vs corrente no mesmo gráfico anterior.

$$B_m = \int_0^l \frac{B(x)}{l} dx \quad \text{onde } l \text{ é a distância entre as peças polares}$$

Experiência 2 - Medida da Constante de Verdet com o laser He-Ne

Faça a montagem da figura 2

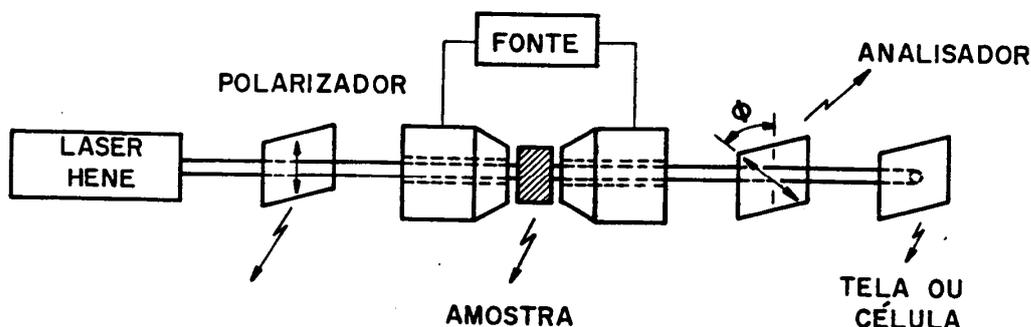


Figura 2: Diagrama esquemático para montagem da experiência de Faraday com laser He-Ne.

Tome cuidado para não olhar diretamente a luz do laser. O polarizador e o analisador devem ficar numa posição de extinção, no qual não deixa passar luz. Tome cuidado de centrar o feixe do laser de tal maneira que não haja reflexão nas paredes internas do furo da peça polar. As superfícies das amostras devem ter aspecto "ótico" a fim de esfriar o espalhamento da luz. Ligue o campo magnético e meça cuidadosamente o ângulo (precisão 0,1 grau!) de rotação que você deve girar o analisador para extinguir o feixe do laser. Faça esta medida com uma amostra em função do campo magnético **para ambas as orientações do campo magnético**. Faça um gráfico de seus resultados (θ vs B) e calcule a constante de Verdet. Compare seu resultado com aqueles da literatura (2) ou das tabelas no final da apostila (λ do laser He-Ne = 632,8 nm), veja outros lasers de comprimentos de onda diferentes. Outros lasers He-Ne, λ laranja = 611,9 nm, λ amarelo = 594,1 nm, λ verde = 543,5 nm.

Experiência 3

O objetivo desta experiência é obter o índice de refração de algumas amostras, não daquela que foi utilizada no experimento anterior, pois tanto as dimensões da amostra utilizada quanto também devido ao alto índice de refração não são possíveis de medir no refratômetro de Abbe instalado no laboratório. Aprenda a utilizar o refratômetro de Abbe, por exemplo, utilizando gotas de água, como também de outras amostras de vidro, compare com alguns valores conhecidos³.

Experiência 4

Existe ao lado do experimento do efeito Faraday outra montagem que se refere a uma aplicação do efeito Faraday. Aplicamos o referido efeito para ser usado na modulação da luz por campo magnético. O experimento é qualitativo e podem observar essa aplicação sem muita dificuldade.

Constante de Verdet (minutos de ângulo/G.S. cm) de alguns vidros e temperatura ambiente.

λ (nm) vidro	435.8	546.1	632.8	1060
SF 59	0,24	0,128	0,089	0,028
SF 58	0,217	0,118	0,082	0,026
SF 57	0,180	0,099	0,069	0,023
SF 6	0,155	0,087	0,061	0,021
SF 1	0,120	0,068	0,047	0,017
SF 5	0,102	0,058	0,041	0,014
SF 2	0,093	0,053	0,035	0,013
F 2	0,083	0,047	0,034	0,012
BK7	0,033	0,020	0,014	0,006

Calcular a constante de Verdet em função do comprimento de onda para este tipo de vidro, utilizando a equação (4) e comparar com os seus resultados. Para isso, considere que identificou o tipo de vidro utilizado no experimento e recorra a sua curva de dispersão que pode ser obtida a través de tabelas do catálogo da Schott ou da fórmula da dispersão, avalie a constante de Verdet a partir do gráfico da dispersão.

$$\frac{e}{m} = \text{carga específica do elétron}$$

λ = comprimento de onda

c = velocidade da luz

n = índice de refração do material no comprimento de onda λ .

A seguinte fórmula da dispersão oferecida pela Schott é válida para o intervalo espectral de 365 a 1014nm e pode ser calculada com apreciável precisão melhor do que $\pm 1 \times 10^{-5}$.

$$n^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^4 + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \quad (5)$$

Os valores dos coeficientes A_i 's e índices de refração em alguns comprimentos de onda, para cada um dos vidros da tabela acima, estão no site desta apostila.

Questões

1. Deduza a relação $V = \frac{e \lambda}{m 2c 2\lambda} \frac{dn}{d\lambda}$.
 2. Por que a constante de Verdet é uma função do comprimento de onda?
 3. Por que se obtêm resultados opostos quando é mudada a direção do campo magnético?
 4. Terá os mesmos resultados com o campo magnético perpendicular ao feixe de luz?
 5. Explique porque você pode considerar um feixe de luz linearmente polarizado como sendo a soma de luz circularmente polarizada à esquerda e à direita.
 6. Conhece algum outro fenômeno que gire o plano de polarização da luz? Explique brevemente.
 7. Descreva a física do gaussímetro ou da sonda de Hall que você usou.
 8. Descreva prováveis aplicações utilizando esse efeito.
 9. O que é espectroscopia magneto-óptica Kerr?
- (veja site: www.el.utwente.nl/tdm/istg/research/mokerr/mokerr.htm)

A constante de Verdet de alguns materiais(2):

Substância	T (°C)	V_D^+ [0,01 ^{1/cm G}]	λ [nm]	V/V _D	
H ₂ O*	0	1.311	303.4	4.627	
	20	1.308	495.8	1.452	
	30	1.306	330.3	3.734	
			546.1	1.184	
			361.1	2.991	
			600.0	0.964	
KLC	16	2.858	546.1	3.28	
KI	20	7.0	546.1	1.185	
NaCl	16	3.585	546.1	4.7	
ZnS(B)	16	22.5	546.1	28.7	
Vidro jena					
S 179	18	1.61			Crown fosfato Flint leve Flint pesado
O 451	18	3.17			
S 143	18	8.88			
CS**	15.6	4.24			
	20	4.23	600.0	0.931	
		4.11			
Fe ₂ Cl ₆	16	-20,41			d=1.6933 g/cm ³ solução em H ₂ O
KI	15	3.41			d=1.6743 g/cm ³ solução em H ₂ O
KI+HgI ₂	12.8				concentrada solução em H ₂ O

⁺V_D = cte de Verdet para a linha amarela do sódio $\lambda = 589.3$ nm

$$^*V_t = C_{20}(1-153(t-20)10^{-6} - 3.06(t-20)^2 10^{-6})$$

$$3 \leq t \leq 98^\circ\text{C}$$

$$^{**}V_1 = C_{20}(1 - 164(t-20)10^{-5} - 1.43(t-20)^2 10^{-5})$$

$$0 \leq t \leq 40^\circ\text{C}$$

Propriedades de vidros Hoya, rotador de Faraday:

	FR -4	FR -5
Constante de Verdet V (min/De-cm) 632.8nm	-0.090	-0.242
1060 nm	-0.026	-0.071
Índice de refração n_d	1.57316	1.68832
n_c	1.57018	1.68445
n_F	1.58006	1.69730
Número de Abbe V_d	58.01	53.56
Índice de refração não linear (10^{-13} e.s.u)	1.59	2.45
Cifra de mérito V_{633} (n_d/n_2)	0.089	0.167
Densidade (g/cm^3)	3.10	4.28
Temperatura de Transformação T_g ($^{\circ}C$)	625	756
Temperatura T_s ($^{\circ}C$)	654	801
Coeficiente de Expansão térmica		
$\alpha_{100 - 300 C}$ ($10^{-7}/^{\circ}C$)	67	50
$\alpha_{20 - 40 C}$ ($10^{-7}/^{\circ}C$)	63	47
$\alpha_{30 - 70 C}$ ($10^{-7}/^{\circ}C$)	61	44
Dureza Knoop H_k (Kgf/mm ²)	(510)	745
Propriedades químicas (% perda peso)		
D_w (H ₂ O 100 $^{\circ}C$ 1 hr)	0.015	0.013
D_A (0.01 N – HNO ₃ 100 $^{\circ}$ 1 hr)	0.055	0.22
Módulo Young Y (Kgf/mm ²)	6651	11035
Módulo de Rigidez G (Kgf/mm ²)	2673	4517
Taxa de Poisson	0.244	0.22
d_n/d_t ($10^6/^{\circ}C$) (20 – 40 $^{\circ}C$)	+2.8	+7.5
d_s/d_T ($10^6/^{\circ}C$) (20 – 40 $^{\circ}C$)	+6.3	+10.7

Referências:

1. Rossi, Optics, Add. Wesley 1959 (p. 362-366, 402-424, 427-430). (Biblioteca IFSC 535 R 8310).
2. A. Jenkins, Fundamental of optics, McGraw-Hi11953 (Biblioteca IFSC 535 J 52 f2).
3. Cotton, R. Lucas e M. Cau, Intemational Critical Tables, 1929, vol. VI, p. 425 (Biblioteca IFSC T 530 N 2771).
4. B. West e R. OB. Carpenter, Handbook ofthe American Physical Society, McGraw-HiIII 1963, p. 6-181 (Biblioteca IFSC H 530 A 512 2).
5. A sua disposição no laboratório de vidros, do grupo de materiais. Também existe um refratômetro no próprio laboratório Avançado de Física ou na Oficina de Óptica
6. E. Waslstrom. Cristalografia Óptica. EUSP (1969).

Versão 2008/MSL