

34^a Olimpíada Internacional de Física

TAIPEI, TAIWAN

Prova experimental

Quarta-feira, 6 de Agosto de 2003

Tempo disponível: 5 horas

Por favor, ler estas instruções antes de iniciar a prova:

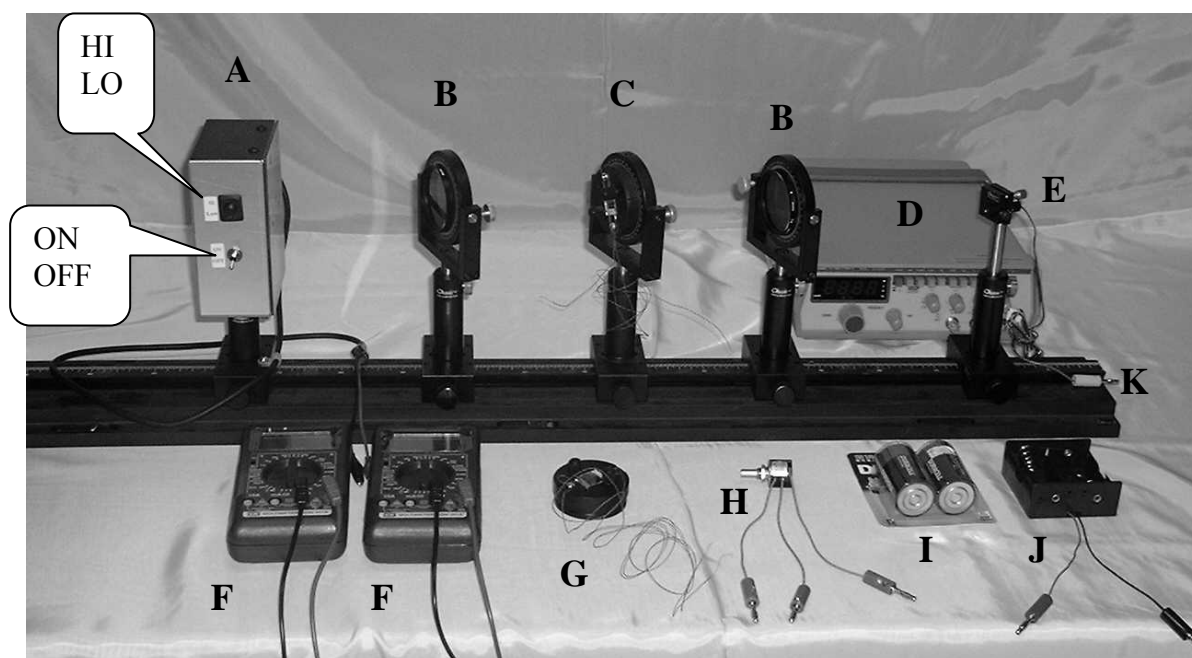
1. Utilizar apenas a caneta que lhe foi fornecida.
2. Utilizar apenas o lado da frente das folhas de papel e das folhas de resposta.
3. Por favor, utilizar o *mínimo de texto*; deverá procurar exprimir-se sobretudo com equações, números, figuras e gráficos. Se o resultado pretendido for numérico, sublinhar o valor final com uma linha ondulada.
4. Escrever nas folhas em branco os resultados das medidas e tudo o mais que considerar relevante para a resolução da questão.
5. Preencher as caixas no topo de cada folha de papel que utilizar, registando o país (*Country*) e o número de estudante (*Student No.*). Numerar cada página e escrever no topo de cada página o número da questão (por exemplo, *Question No.: A-(1)*), o número da página (*Page No.*) e o número total de folhas usadas (*Total No. of pages*). As folhas de rascunho devem ser marcadas com uma grande cruz sobre a folha e não devem ser incluídas na numeração das páginas.
6. No final da prova, ordenar as folhas de cada questão e os gráficos.
7. Apenas na parte A da prova é requerido o desenho de barras de erro nos gráficos.
8. **Devido a mudanças editoriais as figuras do enunciado não estão em ordem sequencial.**
9. **CUIDADO: NÃO DEVE OLHAR DIRECTAMENTE PARA O FEIXE LASER: HÁ RISCO DE LESÃO DOS OLHOS!**

Equipamento e material

1. O equipamento e material disponível é listado na tabela seguinte:

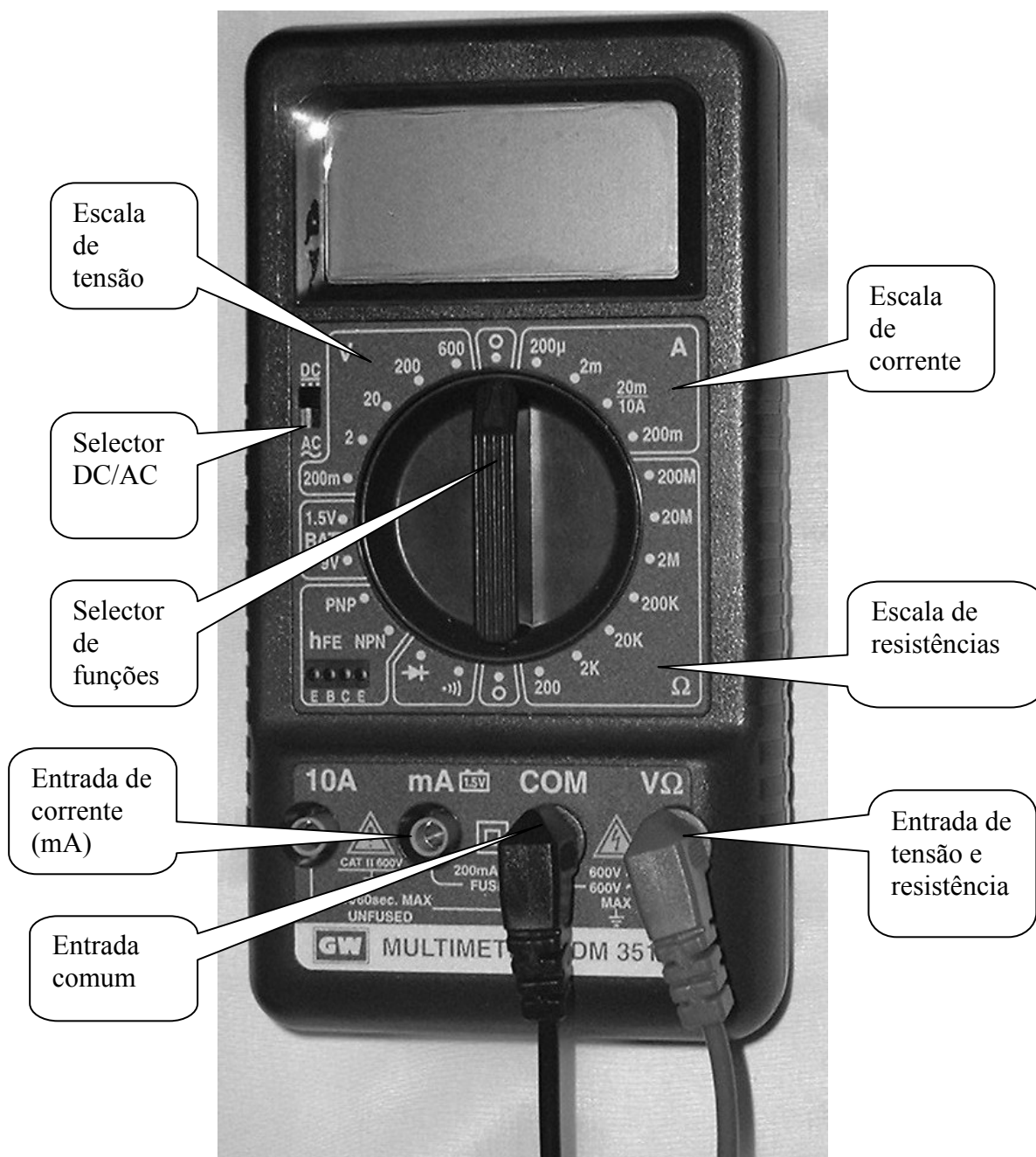
	Equipamento e material	Quantidade		Equipamento e material	Quantidade
A	Fotodetector (PD)	1	I	Pilhas	2
B	Polarizadores com suporte rotativo	2	J	Caixa de pilhas	1
C	Célula CL-NR-90° (fios amarelos) com suporte rotativo	1	K	Banco de óptica	1
D	Gerador de funções	1	L	Papel semi-transparente	2
E	Díodo LASER (LD)	1	M	Régua	1
F	Multímetros	2	N	Fita adesiva branca * (para marcações)	1
G	Célula CL paralela (fios laranja)	1	O	Tesoura	1
H	Resistência variável	1	P	Papel milimétrico	10

* Não fazer qualquer marca escrevendo ou riscando os instrumentos. Quando for necessário efectuar uma marca, colar um pedaço de fita adesiva branca e escrever a marca sobre ela.



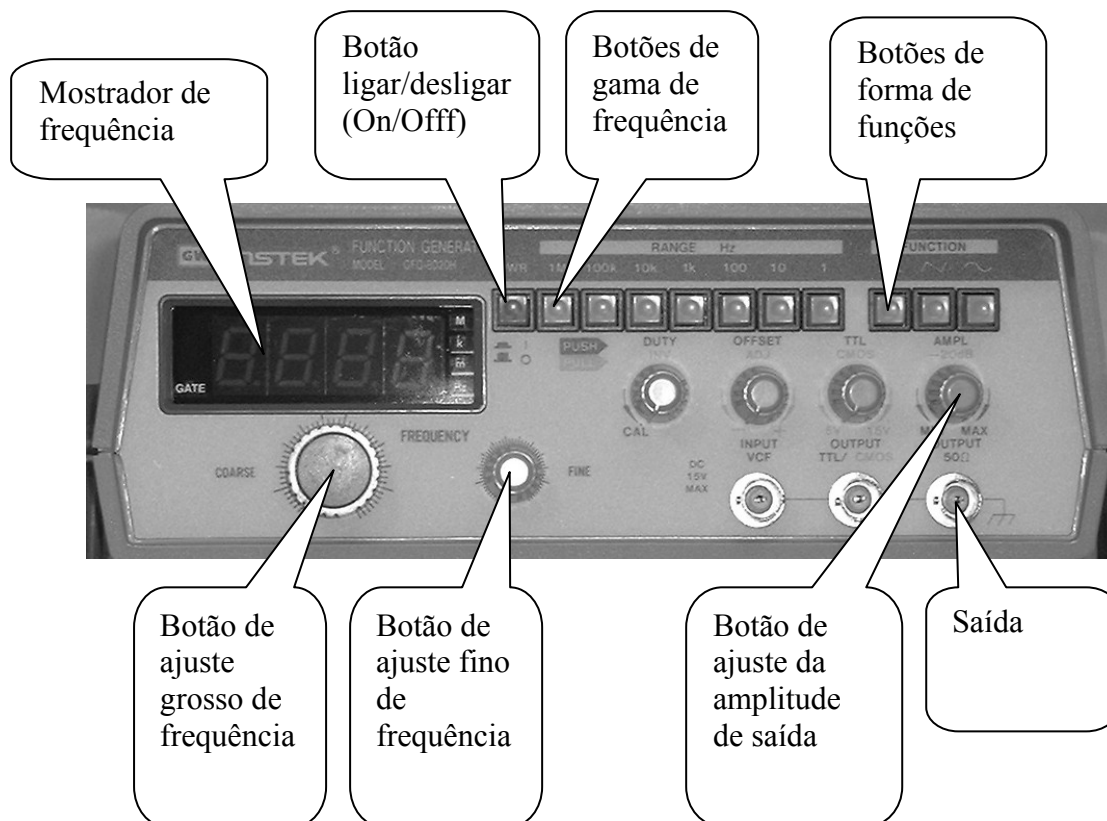
2. Instruções para o multímetro

- Seleccionar “DC/AC” para medidas com corrente contínua/alternada.
- Usar as entradas “VΩ” e “COM” para medidas de tensão e de resistência.
- Usar as entradas “mA” e “COM” para medir correntes pequenas. O mostrador indica, neste caso, a corrente em mili-ampères.
- Usar o botão rotativo para seleccionar o tipo de medida e a escala. “V” é para medidas de tensão, “A” para medidas de corrente e “Ω” para medidas de resistência.



3. Instruções para o gerador de funções

- Ligar o aparelho pressionando uma vez o botão “Power on/off”. Para desligar o aparelho, pressionar de novo este botão.
- Seleccionar a gama de frequências desejada, pressionando o botão apropriado.
- A frequência é indicada no mostrador digital.
- Usar os botões de ajuste “grosso” e “fino” de frequência para sintonizar a frequência pretendida.
- Seleccionar a forma da onda quadrada pressionando o botão da esquerda do conjunto de botões “forma de função”.
- Usar o botão de ajuste de amplitude para ajustar a amplitude (tensão de saída) do sinal.



Parte A – Propriedades ópticas de um díodo LASER

I – Introdução

1. Díodo LASER

A fonte de luz utilizada nesta experiência é um díodo LASER que emite luz de comprimento de onda 650 nm. Quando a corrente que atravessa o díodo LASER (LD) é maior do que um certo valor limite (“*threshold current*”, I_{th}), este díodo pode emitir luz monocromática, parcialmente polarizada e coerente. Quando a corrente que atravessa o díodo é inferior ao valor limite, a intensidade da luz emitida por este é muito baixa. Acima do valor limite, a intensidade da luz emitida aumenta linear e dramaticamente com a intensidade da corrente. Devido ao aumento da temperatura do díodo, há um ponto a partir do qual a intensidade da luz emitida começa a aumentar mais lentamente com a intensidade da corrente que atravessa o díodo. Para operar o LASER, os valores óptimos da corrente que atravessa o díodo são os que se encontram na região onde a intensidade da luz emitida varia linearmente com a corrente. Em geral, a corrente limite, I_{th} , determina-se ajustando uma recta à região linear e encontrando a sua intersecção com o eixo das correntes.

Cuidado: Não deve olhar directamente para o feixe LASER: há risco de lesão dos olhos!

2. Fotodetector

O fotodetector utilizado nesta experiência é um fotodíodo acoplado a um amplificador de corrente. Quando é aplicada ao fotodíodo uma diferença de potencial, a luz incidente nele gera uma corrente, a fotocorrente. Se a temperatura for constante e a luz incidente for monocromática, a fotocorrente é proporcional à intensidade da luz incidente. O amplificador de corrente serve para amplificar e converter esta fotocorrente numa tensão de saída. O fotodetector pode operar em dois regimes: amplificação alta (HI) e baixa (LO). Nesta experiência apenas será usada a posição de baixa amplificação. Contudo, devido a limitações do fotodíodo, a tensão de saída satura perto dos 8 V, quando a intensidade da luz incidente é demasiado alta. Nestas condições o fotodíodo deixa de trabalhar correctamente. O fotodetector deve, portanto, ser operado apenas na região em que a tensão de saída é directamente proporcional à intensidade da luz. Se a intensidade da luz for demasiado alta e o fotodíodo saturar, a tensão de saída do fotodetector não indica correctamente a intensidade da luz incidente.

II – Experiências e procedimentos experimentais

Características do díodo LASER e do fotodetector

Para que as experiências sejam realizadas com sucesso, o alinhamento óptico dos diferentes componentes do dispositivo experimental é crucial. Também é necessário que a fonte de luz e o fotodetector sejam operados nas condições experimentais apropriadas. A parte A está relacionada com estas questões e com a polarização da luz.

1. Montar horizontalmente o díodo LASER e o fotodetector no banco de óptica, tal como mostra a Fig. 5. Ligar a resistência variável, a bateria de pilhas, o amperímetro, o voltímetro, o díodo LASER e o fotodetector como indicado na Fig. 6. Ajustar a resistência variável para que a corrente que atravessa o díodo LASER seja cerca de 25 mA e o díodo LASER emita luz adequadamente. Seleccionar o modo de ganho baixo (LO) do fotodetector. Alinhar o díodo LASER e o fotodetector de tal modo que o feixe de luz entre na pequena abertura da caixa do fotodetector e a leitura do fotodetector seja maximizada. **Cuidado: Evitar curto-circuitos! Em particular, evitar o contacto dos fios preto e vermelho da bateria de pilhas.**

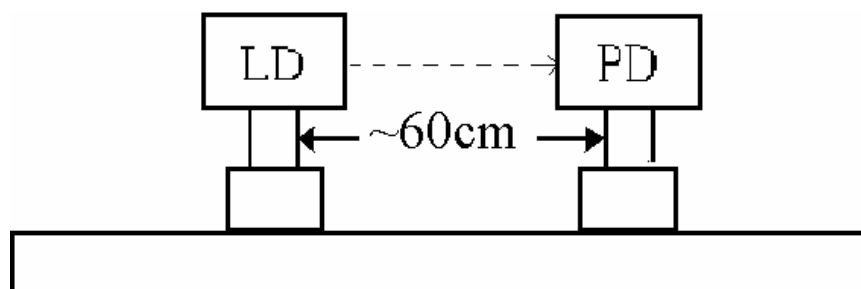


Fig. 5 – Montagem no banco de óptica (LD: díodo LASER; PD: fotodetector)

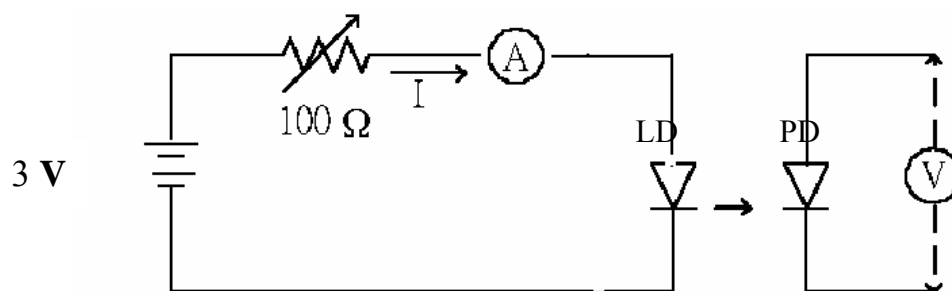


Fig. 6 – Circuito equivalente para a ligação do díodo LASER

2. Usar a tensão de saída do fotodetector como medida da intensidade j da luz LASER. Ajustar a resistência variável para que a corrente I do díodo LASER varie desde zero até um valor máximo e medir j à medida que I aumenta. Assegure-se de que escolhe um incremento de corrente apropriado para estas medidas.

Questão A-(1) (1,5 pontos)

Medir, fazer uma tabela e representar num gráfico j em função de I .

Questão A-(2) (3,5 pontos)

Determinar a corrente máxima, I_m , na região linear da curva de \mathcal{J} em função de I . Marcar a região linear da curva \mathcal{J} - I no gráfico usando duas setas (\downarrow) e determinar a corrente limite (I_{th}). Estimar a incerteza nos dois resultados.

- Escolher uma corrente para funcionamento do diodo LASER igual a $I_{th} + 2(I_m - I_{th})/3$ para assegurar que o diodo e o fotodetector funcionam em boas condições.
- Preparação da parte B da experiência:** Montar um polarizador no banco de óptica junto ao diodo LASER como indicado na Fig. 7. Assegurar-se que o feixe LASER passa pelo centro do polarizador. Ajustar o polarizador de tal modo que o feixe LASER incidente seja perpendicular ao plano do polarizador. (Sugestão: Pode inserir uma folha de papel semitransparente como ecrã para verificar se os pontos luminosos do feixe incidente e reflectido no polarizador coincidem um com o outro no papel.)

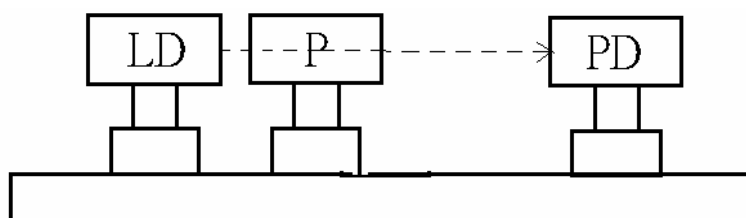


Fig. 7 – Alinhamento do polarizador (P: polarizador)

- Manter a corrente do diodo LASER. Montar um segundo polarizador no banco de óptica e assegurar-se que todos os componentes – fonte, detector e polarizadores – estão bem alinhados numa linha recta e que o plano de cada polarizador é perpendicular ao feixe de luz.

Parte B – Propriedades ópticas de um cristal líquido nemático:

Comutação electro-óptica de uma célula CL-NR-90°

I – Introdução

1. Cristal líquido

Um cristal líquido (CL) é um estado da matéria intermédio entre os sólidos cristalinos e os líquidos amorfos. Os CL nemáticos são compostos orgânicos de moléculas longas e com a forma de uma agulha. A orientação das moléculas pode ser facilmente controlada aplicando um campo eléctrico externo com o qual elas se alinham. A maioria dos dispositivos de CL requer a possibilidade de alinhar uniformemente as moléculas numa direcção bem determinada. A estrutura da célula de CL que será utilizada nesta experiência está representada na Fig. 1. Os substratos de vidro são cobertos com uma fina camada de óxido de estanho e índio (OEI) que é um condutor eléctrico mas é opticamente transparente. Esta camada é depois coberta com uma camada fina de poliimida (PI). Esfregando a camada de PI com lixa para polir lentes são produzidas pequenas micro-ranhas. Estas micro-ranhas forçam as moléculas do CL junto à superfície a alinhar-se paralelamente com as ranhas. A interacção molecular leva depois todas as moléculas do CL a alinharem-se da mesma forma. A orientação das moléculas num dado ponto designa-se por director do CL nesse ponto.

A célula de CL exhibe o fenómeno a que se dá o nome de dupla refacção (possui dois índices de refacção). Quando a luz se propaga na direcção do director, a velocidade de propagação da luz é independente da polarização e o seu valor é $v_o = \frac{c}{n_o}$, onde n_o é o índice de refacção

ordinário. Esta direcção de propagação (a direcção do director) é designada por eixo óptico da célula de CL. Quando um feixe de luz se propaga numa direcção perpendicular ao eixo óptico existem, em geral, duas velocidades de propagação. O campo eléctrico da luz polarizada perpendicularmente ao eixo óptico propaga-se com velocidade $v_o = \frac{c}{n_o}$ e o da luz polarizada

paralelamente ao eixo óptico propaga-se com velocidade $v_e = \frac{c}{n_e}$, onde n_e é o índice de refacção extraordinário. A bi-refringência (anisotropia óptica) define-se como a diferença entre os índices de refacção extraordinário e ordinário $\Delta n = n_e - n_o$.

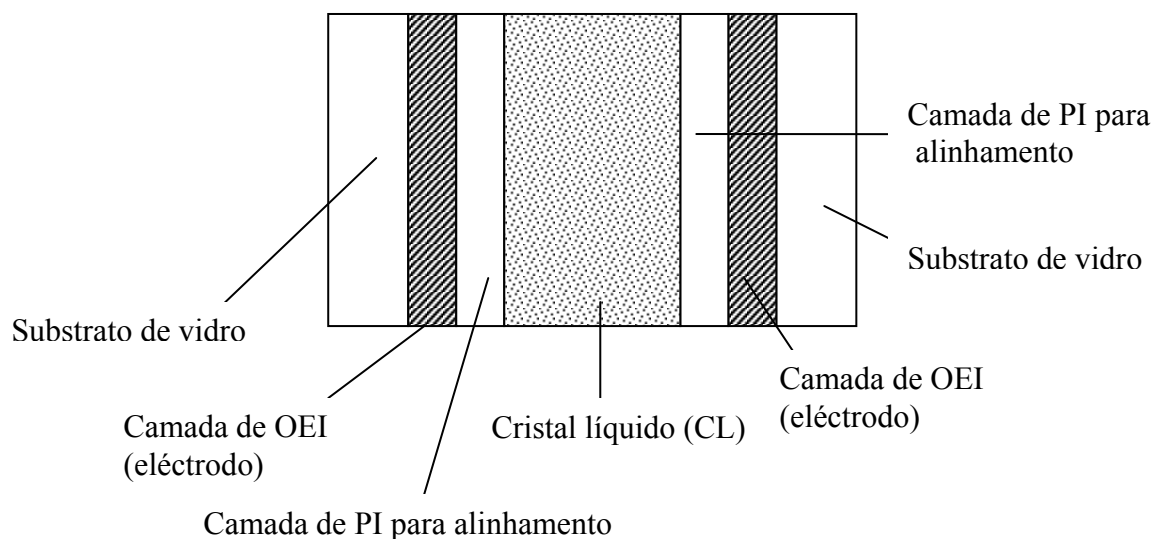


Fig. 1 – Estrutura de uma célula de cristal líquido (CL)

2. Célula de cristal líquido nemático rodada de 90° (CL-NR-90°)

Na célula de CL nemático rodada de 90° (CL-NR-90°) esquematizada na Fig. 2, o director do CL da superfície de saída está rodado de 90° em relação ao da superfície de entrada. O director local à entrada é paralelo ao eixo de transmissão de um polarizador que converte, logo à entrada, a luz incidente não polarizada em luz polarizada linearmente.

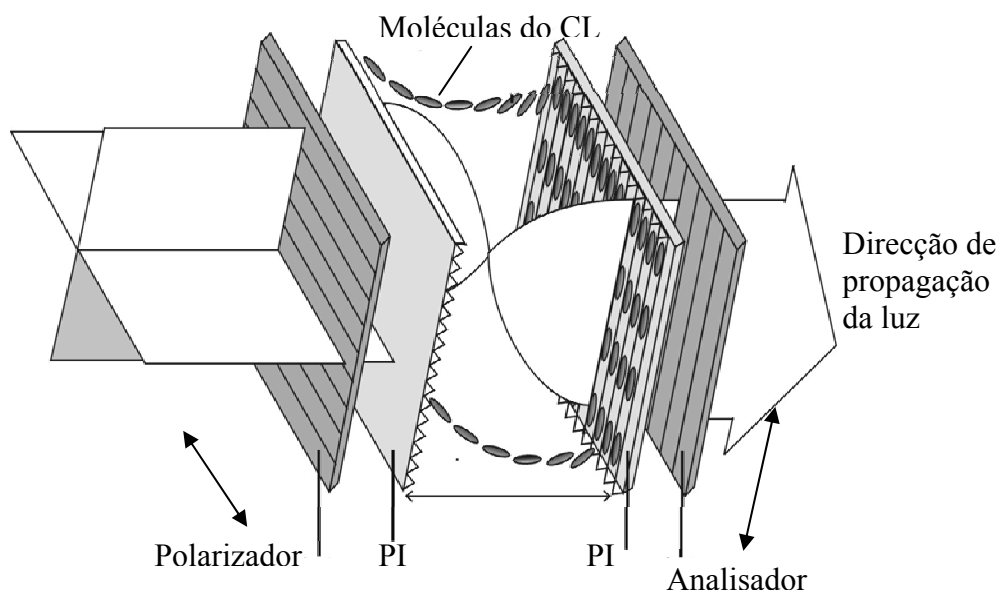


Fig. 2 – Célula de CL-NR-90°

Quando luz polarizada linearmente atravessa uma célula CL-NR-90°, a polarização segue a rotação dos directores do CL (a luz polarizada apenas “vê” o índice de refacção n_e), pelo que o feixe que sai da célula é ainda linearmente polarizado, mas o eixo de polarização está

rodado de 90° (este efeito designa-se “rotação de polarização da luz por n_e ”; de forma semelhante, pode ocorrer “rotação de polarização da luz por n_o ”). Assim, para que uma célula de CL-NR- 90° seja escura em condições normais (modo NE), um segundo polarizador (o analisador) é colocado à saída com o seu eixo de transmissão paralelo ao do primeiro polarizador (o polarizador), como se mostra na Fig. 3. Contudo, quando uma tensão V aplicada à célula excede um certo valor crítico V_c , os directores das moléculas do CL tendem a alinhar-se com a direcção do campo eléctrico externo aplicado, que é a direcção de propagação da luz. Deste modo, a capacidade que a célula de CL tem de guiar a polarização vai diminuindo, e alguma luz consegue atravessar o analisador. O coeficiente electro-óptico de comutação γ define-se como $\gamma = \frac{V_{90} - V_{10}}{V_{10}}$, onde V_{10} e V_{90} são as diferenças de potencial aplicadas à célula que permitem que a luz transmitida seja 10% e 90%, respectivamente, do máximo de luz transmitida.

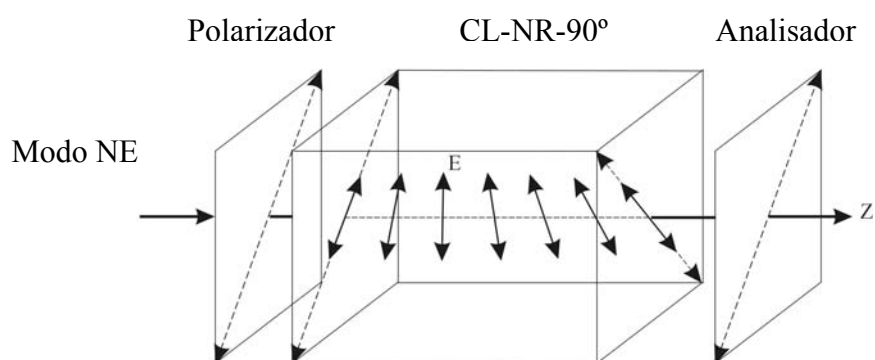


Fig. 3 – Modo NE de uma célula NR de 90°

II – Experiências e procedimentos experimentais

Comutação electro-óptica de uma célula CL-NR-90°

1. Montar uma célula CL-NR-90° em modo NE, colocando a célula entre dois polarizadores com eixos de transmissão paralelos e aplicando uma diferença de potencial aos eléctrodos de OEI com o gerador de funções ajustado para uma onda quadrada de 100 Hz. Variar a tensão aplicada (V_{rms}) de 0 a 7,2 V. *Nos pontos críticos de viragem, medir mais pontos se necessário.*

Questão B-(1) (5,0 pontos)

Medir, tabular e fazer um gráfico da curva de comutação electro-óptica (curva de J em função de V_{rms}) da célula CL-NR-90° em modo NE. Determinar o coeficiente electro-óptico de comutação γ , onde $\gamma = \frac{V_{90} - V_{10}}{V_{10}}$.

Questão B-(2) (2,5 pontos)

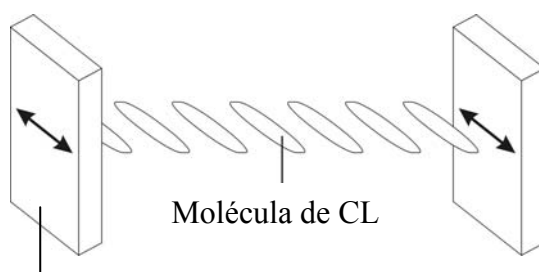
Determinar a diferença de potencial crítica V_c do modo NE desta célula CL-NR-90°. Indicar explicitamente com um gráfico como determinar V_c . *Sugestão:* Quando a diferença de potencial externa aplicada passa o valor crítico, a transmissão de luz aumenta abruptamente.

Parte C – Propriedades ópticas de um cristal líquido nemático: Comutação electro-óptica de uma célula CL paralelamente alinhada

I – Introdução

1. Célula de cristal líquido homogénea e paralelamente alinhada

Numa célula de CL paralelamente alinhada, os directores dos substratos de entrada e saída são paralelos, como mostra a Fig. 4. Quando luz linearmente polarizada incide numa célula paralelamente alinhada com a sua polarização paralela ao director do CL (direcção das micro-ranhuradas), ocorre uma modulação de fase pura, pois a luz comporta-se apenas como um raio extraordinário.



Substrato de vidro coberto por OEI + PI

Fig. 4 – Célula de CL homogénea e paralelamente alinhada

Contudo, se luz linearmente polarizada incidir perpendicularmente na célula paralelamente alinhada com a sua polarização fazendo um ângulo $\theta = 45^\circ$ com a direcção dos directores do CL (ver Fig. 8), há um atraso de fase devido às diferentes velocidades de propagação dos raios ordinário e extraordinário no seio do CL. Para esta configuração em que $\theta = 45^\circ$, e quando os dois polarizadores são paralelos, a transmissão normalizada numa célula de CL paralelamente alinhada é dada por

$$T_{\parallel} = \cos^2 \frac{\delta}{2}.$$

O atraso de fase ou desfasamento δ é dado por

$$\delta = 2\pi d \Delta n(V, \lambda) / \lambda$$

onde d é a espessura da camada de CL da célula, λ é o comprimento de onda da luz no ar, V é a tensão efectiva rms aplicada e Δn é uma função de λ e V que mede a bi-refringência do CL. Faz-se notar que $\Delta n (= n_e - n_o)$ e δ atingem o seu valor máximo para $V = 0$. À medida que V aumenta, Δn diminui.

No caso geral,

$$T_{\parallel} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

$$T_{\perp} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

onde \parallel e \perp indicam as situações em que o eixo de transmissão do analisador se encontra alinhado paralelamente ou perpendicularmente ao eixo do polarizador, respectivamente.

II – Experiências e procedimentos experimentais

Comutação electro-óptica de uma célula CL paralelamente alinhada

1. Substituir a célula CL-NR-90° pela célula CL paralelamente alinhada.
2. Montar a configuração $\theta = 45^\circ$ para $V=0$ tal como se indica na Fig. 8. Colocar o eixo de transmissão do analisador perpendicularmente ao eixo de transmissão do polarizador. De seguida, rodar a célula CL paralelamente alinhada até a intensidade da luz transmitida atingir o seu valor máximo (T_{\perp}). Este procedimento permite determinar a configuração $\theta = 45^\circ$. Anotar o valor de T_{\perp} . De seguida medir a intensidade da luz transmitida (T_{\parallel}) da mesma célula CL quando o eixo de transmissão do analisador está paralelo ao do polarizador (também para $V=0$).

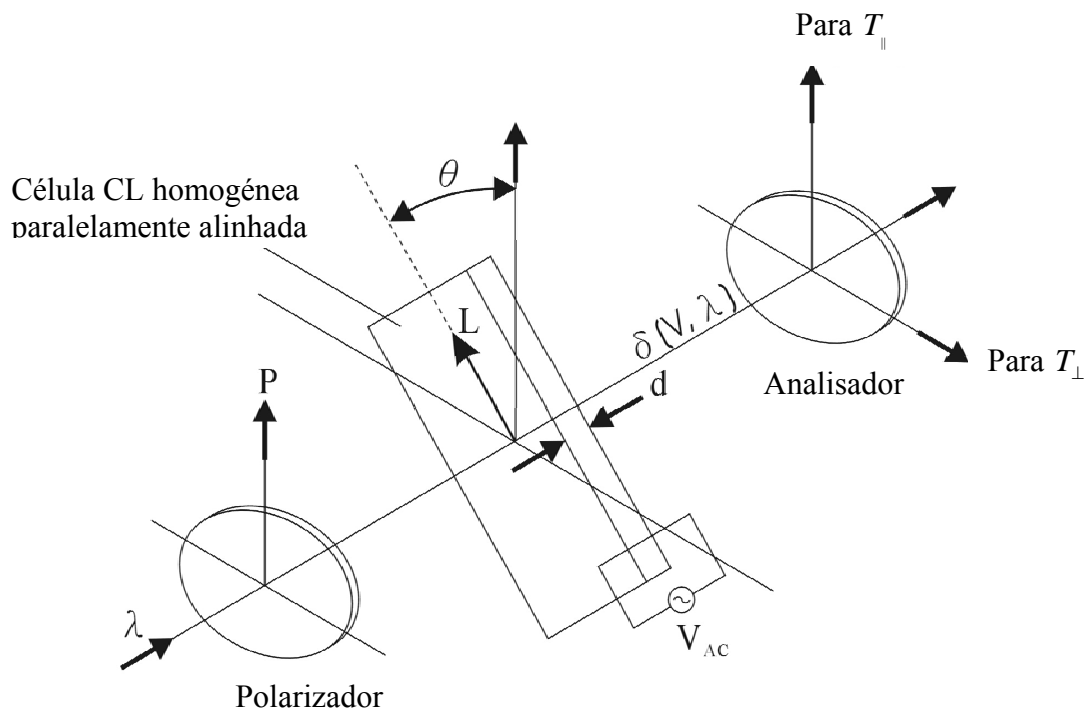


Fig. 8 – Diagrama esquemático da montagem experimental (a seta L indica a direcção do alinhamento)

Questão C-(1) (2,5 pontos)

Assumir que o comprimento de onda da luz LASER é 650 nm, a espessura da camada de CL na célula é 7,7 μm e que o valor aproximado de Δn é conhecido ($\Delta n \approx 0,25$). A partir dos valores experimentais que obteve para T_{\perp} e T_{\parallel} , calcular o valor do desfaseamento (atraso de fase) δ e o valor exacto da birefringência desta célula para $V=0$.

3. De modo similar ao efectuado na questão B-(1), mas agora com a célula CL homogénea paralelamente alinhada e na configuração $\theta = 45^\circ$, aplicar uma diferença de potencial aos eléctrodos de OEI com o gerador de funções ajustado para uma onda quadrada de 100 Hz e variar a tensão aplicada (V_{rms}) de 0 a 7 V. Para cada tensão, medir T_{\parallel} (curva de comutação electro-óptica com o eixo de transmissão do analisador paralelo ao eixo de transmissão do polarizador).

Notas e sugestões:

- A medida de T_{\perp} pode ajudar a aumentar a precisão dos dados de T_{\parallel} . Contudo, os dados de T_{\perp} não são necessários para as questões seguintes.
- *Nos pontos críticos de viragem, medir mais pontos se necessário, especialmente no intervalo entre 0,5 e 4,0 V.*

Questão C-(2) (3,0 pontos)

Medir, tabular e representar num gráfico a curva de comutação electro-óptica para T_{\parallel} desta célula CL paralelamente alinhada na configuração $\theta = 45^\circ$.

Questão C-(3) (2,0 pontos)

A partir dos dados da curva de comutação electro-óptica, determinar o valor V_{π} da tensão do campo externo aplicado.

Notas e sugestões:

- V_{π} é a tensão aplicada que introduz um atraso de fase na célula de valor π ou seja 180° .
- Recordar que Δn é uma função da tensão aplicada e que Δn diminui quando V aumenta.
- Talvez seja necessário interpolar entre os valores experimentais para determinar com maior precisão o valor de V_{π} .