

EXPERIMENTO B5 – INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

B5.1 EQUIPAMENTO

Interferômetro de Michelson em tamanho padrão (50x50 cm), em base magnética, com suportes magnéticos, espelhos totais ($R = 99\%$ ou superior), espelho semirrefletor (50%), lentes plano-convexas de distância focal $f = 20, 50$ e 100 mm, micrômetro com graduação de 10 em $10 \mu\text{m}$, acoplado a braço com redução de distância $1:20$, e anteparos (telas). Laser de He-Ne ($\lambda = 632,8$ nm) para referência. Laser de estado sólido de arsenieto de gálio (GaAs), de comprimento de onda a ser determinado. Bomba de vácuo manual. Manômetro graduado na faixa 0 a -1.000 mbar, com precisão 10 mbar. Célula para armazenamento de gás (ar) e realização de vácuo.

B5.2 PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

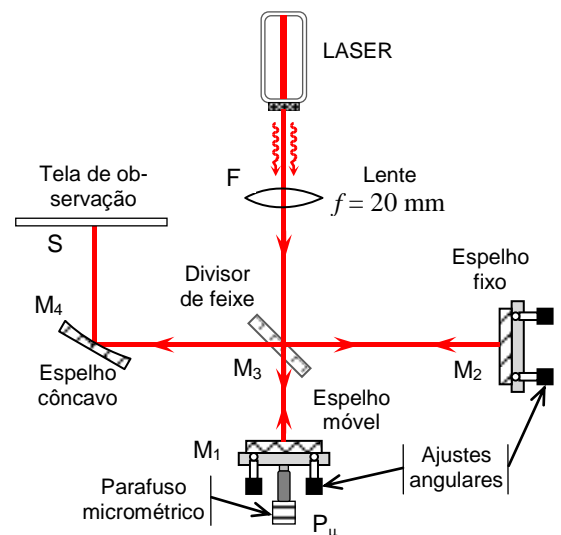
Franjas circulares de interferência são observadas no arranjo do interferômetro de Michelson, permitindo a medida de comprimentos de onda e índices de refração.

- Observar os anéis de interferência no interferômetro de Michelson com um laser de He-Ne e calibrar o fator de redução no avanço do parafuso micrométrico;
- Observar os anéis de interferência no interferômetro de Michelson com um laser de diodo operando no visível e determinar seu comprimento de onda;
- Determinar o índice de refração do ar utilizando o interferômetro de Michelson, laser de He-Ne e a célula de gás contendo ar a pressões variáveis.

B5.3 TEORIA

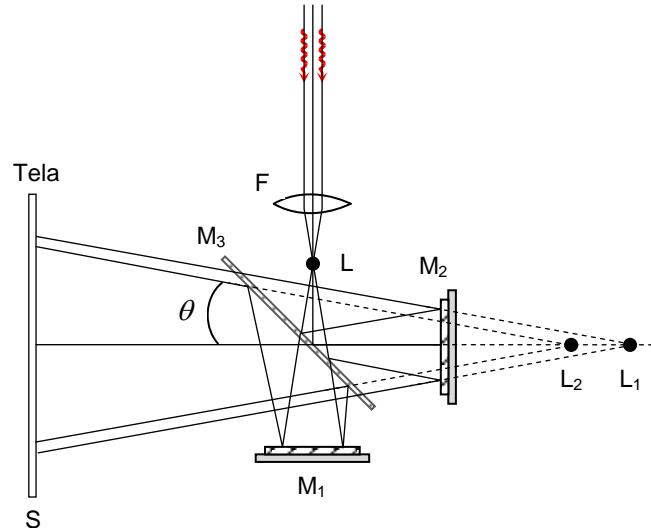
Obtenção do comprimento de onda do laser de diodo:

O arranjo experimental encontra-se esquematizado na figura ao lado, com uma ilustração da trajetória dos feixes que causam o padrão de interferência. O feixe laser de He-Ne, utilizado inicialmente para calibrar o interferômetro, incide sobre o espelho semirrefletor central M_3 (divisor de feixe) segundo um ângulo de incidência de 45° , onde se divide em dois feixes perpendiculares. Estes são refletidos pelos outros dois espelhos cruzados (M_1 e M_2) e sofrem interferência na região entre M_3 e o espelho côncavo M_4 . O espelho côncavo direciona o feixe para o anteparo S de observação das franjas.



Os espelhos M_1 e M_2 possuem parafusos para ajustá-los aproximadamente perpendiculares à direção do feixe que sobre eles incidem. O espelho M_1 está acoplado a um parafuso micrométrico (P_μ) de precisão de ajuste $10 \mu\text{m}$, através de um braço de alavanca com fator de redução de aproximadamente 20 , o qual serve para alterar a diferença de caminho óptico entre os dois lados M_3M_1 e M_3M_2 .

O processo de formação de franjas circulares de interferência pode ser entendido com base na próxima figura (deformada, para facilitar a compreensão das reflexões), onde se vêem os raios refletidos nos espelhos e se mostram as imagens virtuais da fonte (L_1 e L_2) formadas a partir das sucessivas reflexões nos três espelhos. A multiplicidade de raios decorre da lente de focalização F , de curta distância focal, colocada na saída de luz laser e antes do espelho semirrefletor M_3 , a qual produz um feixe composto de raios formando um cone de luz.



A superposição dos feixes refletidos pelos espelhos fixo e móvel na tela de observação dá origem a um padrão de franjas de interferência circulares devido à diferença de caminho óptico de cada feixe. Quando todos os feixes se propagam no mesmo meio, essa diferença de caminho óptico é causada unicamente pela diferença de trajetória entre os dois feixes, o que provoca uma diferença de fase entre as funções de onda que se superpõem na tela. As imagens virtuais L_1 e L_2 da fonte real atuam como fontes pontuais a partir das quais pode ser feita toda a descrição da formação do padrão de interferência observado na tela.

Sejam d_1 e d_2 as distâncias entre o ponto médio do divisor central M_3 e os espelhos M_1 e M_2 , respectivamente, e d a diferença entre essas duas distâncias ($d = d_2 - d_1$). Então a distância entre as imagens virtuais L_1 e L_2 será dada por

$$\Delta L = 2d = 2(d_2 - d_1) . \quad (1)$$

Se θ representa o ângulo, medido em relação ao eixo de simetria perpendicular à tela e passando pelo centro dos anéis, formado por um par de raios paralelos que partem de L_1 e L_2 e se superpõem na tela (na aproximação de longas distâncias de observação) para formar os anéis de interferência, então a diferença de fase entre esses raios ao chegarem à tela pode ser escrita pela expressão

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(2d \cos\theta) + \Delta\phi_0 . \quad (2)$$

Nesta expressão, $\Delta\phi_0$ representa a diferença global de fase (constante em relação a θ), entre os raios, devida às reflexões múltiplas que eles sofrem e ao fato de tais raios atravessarem o divisor central M_3 um número diferente de vezes.

Sendo λ o comprimento de onda do laser e n ($= 1, 2, 3, \dots$) um número natural, os máximos de interferência são obtidos na tela para os ângulos que satisfazem a condição

$$2d \cos\theta = n\lambda - \frac{\lambda}{2\pi}\Delta\phi_0 . \quad (3)$$

A condição para ocorrência de mínimos é obtida da expressão acima trocando $n \rightarrow n+1/2$. Essas expressões justificam a formação de franjas circulares de interferência para cada valor de n .

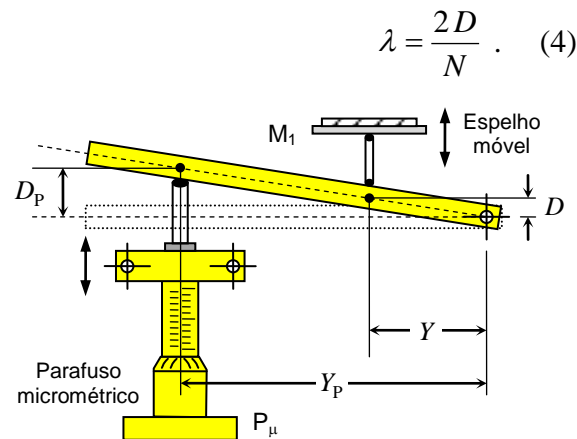
Se o espelho M_1 é deslocado de uma distância Δx , a distância entre L_1 e L_2 muda para

$$\Delta L' = 2d' = 2d \pm 2\Delta x .$$

Suponha que d satisfaça inicialmente uma condição de máximo (ou de mínimo) para um dado n . O anel correspondente vai passar de uma condição para outra de máximo (ou de mínimo) cada vez que Δx for um múltiplo inteiro de $\lambda/2$. Assim, observando-se a sucessão de máximos (ou de mínimos) em um dado ponto fixo (o centro dos anéis, ou uma franja circular), pode-se obter uma relação direta entre o comprimento de onda e o deslocamento do espelho. Se o espelho M_1 for deslocado de uma distância total D enquanto são contados N máximos no centro da tela, então

$$\lambda = \frac{2D}{N} . \quad (4)$$

Na prática o que se mede é o deslocamento D_p do parafuso micrométrico P_μ , o qual se relaciona a D através do fator de redução R característico do mecanismo de alavanca que é usado (ver figura). A distância D não pode ser medida diretamente (não dá para medir com precisão Y , nem Y_p). Por regra de três simples, $D_p = D \cdot Y_p / Y$. Com $Y_p / Y \equiv R$ sendo o fator de redução ($R > 1$), então tem-se



$$D = \frac{D_p}{R} . \quad (5)$$

A partir da determinação do fator de redução R para um laser conhecido ($\lambda_{\text{HeNe}} = 632,8\text{nm}$), mede-se o deslocamento D' associado ao conjunto N de máximos variados e daí se obtém $\lambda' = \lambda_{\text{Diodo}}$.

Obtenção do índice de refração do ar nas CNTP:

Para a medida do índice de refração do ar, as distâncias d_1 e d_2 são mantidas fixas e a célula contendo ar à pressão atmosférica é introduzida entre os espelhos M_3 e M_1 . A variação do índice de refração do ar n com a pressão p pode ser escrita, em primeira aproximação, por uma função linear

$$n(p) = n_0 + \frac{\Delta n}{\Delta p} p , \quad (6)$$

onde $n_0 = 1$ é o índice de refração do vácuo e a razão positiva, por definição, $\Delta n / \Delta p$ é o parâmetro a ser determinado experimentalmente.

Se a célula cheia de ar à pressão p possui uma espessura δ , então o caminho óptico percorrido dentro da célula pelo raio que é refletido em M_1 , após atravessá-la duas vezes, é dado por $x = n(p) \cdot 2\delta$. Quando a pressão dentro da célula for alterada de p para $p + \Delta p$, então o caminho óptico do mesmo raio sofrerá uma alteração de

$$\Delta x = [n(p + \Delta p) - n(p)] \cdot 2\delta . \quad (7)$$

Iniciando à pressão ambiente, com um ponto de mínimo (ou de máximo) no centro da figura de interferência observada no anteparo, e reduzindo progressivamente a pressão dentro da célula, são observadas N alterações de mínimo para mínimo no centro da tela e anotados os valores corresponden-

tes de pressão p . Como cada alteração de mínimo corresponde a uma mudança no caminho ótico de um comprimento de onda λ , então a contagem do número de alterações entre os valores de pressão p e $p + \Delta p$, representado por $N(p + \Delta p) - N(p)$, está relacionada à variação no caminho ótico por

$$|\Delta x| = [N(p + \Delta p) - N(p)] \cdot \lambda \quad (8)$$

Esta expressão foi escrita em termos de valores absolutos já que variações positivas ou negativas do caminho ótico levam à mesma alteração qualitativa no padrão de interferência. Agora, combinando as equações (7) e (8), obtém-se o parâmetro necessário para encontrar o índice de refração n do ar à pressão atmosférica p (ver Eq. (6)), ou seja,

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \left| \frac{\Delta N}{\Delta p} \right| \cdot \frac{\lambda}{2\delta} \quad (9)$$

B5.4 CONCEITOS BÁSICOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

- Explique o que você entende por caminho ótico, enfatizando claramente a diferença entre caminho ótico e caminho geométrico.
- Explique o que você entende por coerência e qual sua importância na observação de fenômenos de interferência. Explique também o conceito colimação de um feixe de luz.
- O que é um laser? O que significa a expressão “laser”? Quais são as principais características de um laser?
- Explique de maneira simplificada como funciona um laser de gás (como o de He-Ne) e como funciona um laser de diodo. Utilize esquemas para ilustrar o funcionamento de ambos os lasers. Porque o laser de He-Ne possui dois gases distintos no tubo?
- Deduza as equações (1)–(3).
- A lei de Gladstone, de origem empírica, estabelece que a quantidade $n - n_0$, onde n é o índice de refração do ar, é diretamente proporcional à densidade do ar, em uma dada temperatura. Discuta qualitativamente a correlação entre essa lei e a variação de n com a pressão descrita na Eq. (6). De que outros parâmetros físicos você espera que o índice de refração do ar dependa?

B5.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Obtenção do fator de redução do deslocamento do parafuso micrométrico; e

Medida do comprimento de onda do laser de estado sólido (diodo):

Para estabelecer o alinhamento do sistema, remova inicialmente a lente F, para que os feixes laser produzam imagens pontuais na tela. Ajuste os dois parafusos localizados atrás dos espelhos móvel M_1 e fixo M_2 , de modo que essas duas imagens coincidam na tela de observação, e produzam a interferência desejada. Posicione a lente convergente (distância focal $f = +20$ mm) no trilho ótico entre o laser e o espelho M_3 , de forma a produzir uma imagem real pontual que será a fonte de luz para o interferômetro (ver ponto L na figura dos raios). Com isso os dois feixes produzirão na tela imagens circulares estendidas. Com um reajuste fino dos dois parafusos de controle do espelho fixo, um padrão de interferência deverá ser agora observado com nitidez, formado por franjas circulares concêntricas. Reduza a iluminação ambiente para facilitar a visualização das franjas.

A distância entre o espelhos móvel e semirrefletor central pode ser ajustada através de um parafuso micrométrico P_μ conectado ao espelho móvel. É conveniente realizar previamente uma medida com um laser de comprimento de onda conhecido a fim de determinar com precisão o fator de redução R

que relaciona a distância percorrida pelo espelho móvel com o deslocamento associado a P_μ (medido diretamente no micrômetro a ele conectado). Note que o cilindro externo de ajuste do micrômetro precisa dar duas voltas completas para percorrer 1 mm. Como a escala rotacional conta com 50 unidades, cada divisão corresponde a um centésimo de mm, ou seja, 10 μm .

Agora, gire P_μ até que o centro da figura de interferência corresponda a uma franja escura, ou seja, interferência destrutiva (ou um máximo, o que é mais difícil de estabelecer, por causa do fator de persistência da luz na retina). Alternativamente, um procedimento mais simples consiste em marcar no anteparo as bordas de uma das franjas circulares e contar a quantidade de franjas, claras ou escuras, que passam nessa marcação, à medida que o parafuso é deslocado. Uma alternância de mínimo para mínimo no centro da figura de interferência é equivalente à passagem de duas franjas claras consecutivamente sobre a marca traçada.

Prossiga girando o P_μ no mesmo sentido e observe a alternância de máximos e de mínimos de interferência no centro da projeção. Não inverta o sentido de rotação do micrômetro durante a mesma sequência de medidas, pois senão podem ocorrer erros devido à existência de atraso de sincronismo entre os movimentos do parafuso micrométrico e do espelho móvel, causado por alguns fatores (poeira, mecanismo de retração ineficiente, perda de elasticidade da mola de retração, etc.).

Registre o deslocamento de P_μ a cada 10 alternâncias de mínimos no centro da figura de interferência (ou de máximos sobre a marca de referência), até completar o maior número possível de alternâncias (em torno de 120, no mínimo, ou seja, doze passagens de 10 alternâncias). Se eventualmente o centro da figura de interferência deslocar-se para fora da área iluminada, reajuste os parafusos de controle dos espelhos fixo e móvel e reinicie a medida.

Repita essa série de medidas para um total de pelo menos três vezes, sempre reiniciando a contagem da alternância de mínimos em uma posição diferente do parafuso micrométrico. Faça pelo menos uma das séries, com rotação de P_μ no sentido invertido (diminuindo a leitura do micrômetro), para garantir que não há histerese em seu mecanismo de movimento.

Repita todos os procedimentos acima, utilizando agora o laser de diodo no lugar do laser de He-Ne.

Medida do índice de refração do ar:

Reposicione o laser de He-Ne e reajuste o parafuso micrométrico para obter novamente um mínimo no centro da figura de interferência (ou máximo sobre a marca de referência traçada no anteparo). Refaça o alinhamento para obter franjas de interferência como antes.

Posicione a célula para armazenamento de gás, contendo ar à pressão atmosférica, no espaço apropriado localizado diante do espelho móvel M_1 . Mantenha a saída da célula fechada. Observe que a célula já está conectada a entrada à bomba de vácuo manual, através de uma mangueira de silicone.

Reduza gradualmente a pressão dentro da célula, utilizando a bomba manual. Durante esse processo, verifica-se uma alternância de máximos e mínimos no centro da figura de interferência (ou sobre a marca de referência) projetada no anteparo de observação. Anote a variação de pressão Δp (lida diretamente no manômetro) correspondente a cada mínimo detectado.

Repita o procedimento acima no mínimo cinco vezes, para obter medidas precisas das pressões em que ocorrem as alternâncias de mínimos (ou máximos). Abra a válvula da bomba manual no princípio de cada série de medidas, de forma que o ar na célula retorne à pressão ambiente.

B5.6 CUIDADOS A SEREM ADOTADOS NO LABORATÓRIO

- Nunca olhe diretamente para o feixe laser, pois ele pode causar danos irreversíveis à sua visão.
- O interferômetro é um equipamento delicado e preciso, cujo manuseio requer atenção e cuidado para evitar danos ao equipamento e prejuízo na qualidade das medidas efetuadas.
- O bom funcionamento do interferômetro depende fundamentalmente do alinhamento e nivelamento do sistema. Procure evitar portanto qualquer fonte de perturbações mecânicas nas proximidades no interferômetro. Não fique esbarrando na mesa onde ele se encontra. Faça as anotações de dados na mesa ao lado, e não na mesa onde se encontra o interferômetro.
- Nunca toque com os dedos nas superfícies dos espelhos e nem na célula para armazenamento de gás. Seu dedo deixará uma espécie de óleo que formará uma película não uniforme sobre os elementos óticos, prejudicando a coerência ótica no experimento.

B5.7 ANÁLISES E CONCLUSÕES

- A. Organize em uma tabela os dados de N (número de alternâncias de máximos de interferência) em função do deslocamento D_p do parafuso micrométrico. Utilize as várias medidas efetuadas para obter os valores médios e as incertezas para D_p , tomando o cuidado de ajustar para a mesma origem as medidas feitas para diferentes posições iniciais do parafuso.
- B. Faça um gráfico de N em função de D_p e obtenha o coeficiente angular (com incerteza) a partir de um ajuste linear apropriado. Das equações (4) e (5) e do valor conhecido para o laser de referência $\lambda_{\text{HeNe}} = 632,8 \text{ nm}$, determine o valor do fator de redução R .
- C. Organize uma tabela equivalente para o laser de diodo, com os dados referentes ao deslocamento D_p . Ponha na mesma tabela os valores da distância D (com incerteza) efetivamente percorrida pelo espelho móvel M_1 , utilizando o valor determinado para o fator R .
- D. Faça um gráfico de N em função de D e determine a partir de um ajuste linear o valor do comprimento de onda λ_{Diodo} do laser de diodo utilizado (com incerteza). Compare com o valor típico especificado no diodo (em torno de 670 nm).
- E. Alternativamente, você pode optar por fazer o gráfico de N em função de D_p também para o laser de diodo e a seguir, usando as equações (4) e (5) e uma regra de três simples, determinar diretamente o comprimento de onda do laser de diodo, sem passar pelo cálculo explícito do fator de redução, o qual é o mesmo para os experimentos envolvendo os dois tipos de laser.

B5.8 DISCUSSÕES ADICIONAIS

- ✓ Discuta o conceito de *comprimento de coerência* e sua importância na observação dos fenômenos de interferência com lasers e com outras formas de radiação.
- ✓ O interferômetro de Michelson e outros tipos de interferômetros podem ser usados para medidas muito precisas de distâncias, empregando-se radiação monocromática com comprimento de onda conhecido. Discuta qual a vantagem da utilização de interferômetros para esse fim e, utilizando o valor do comprimento de onda do laser de He-Ne usado nesta prática, estime qual a menor distância que pode ser medida com um interferômetro de Michelson.
- ✓ O físico americano A. A. Michelson ganhou o prêmio Nobel em 1907 por seu trabalho na aferição do metro padrão utilizando um interferômetro similar ao empregado nesta prática. A partir de 1961 a definição de metro passou a ser feita com base no comprimento de onda de uma certa radiação emitida por átomos do elemento ^{86}Kr . Discuta quais as vantagens de se adotarem medidas baseadas num interferômetro para o estabelecimento do padrão de comprimento. (Atualmente o padrão de comprimento é definido a partir da velocidade da luz.)
- ✓ Descreva a experiência de Michelson-Morley e discuta sua importância histórica para a teoria da relatividade restrita.
- ✓ O procedimento usado nesta prática envolveu a medida da variação do índice de refração do ar com a pressão. Descreva como seria um experimento similar (envolvendo o interferômetro de Michelson) para determinação da variação do índice de refração do ar com a temperatura.
- ✓ O método de variação de pressão para obtenção do índice de refração obviamente não funciona para substâncias sólidas. Como o interferômetro de Michelson poderia ser usado para a determinação do índice de refração de uma placa de vidro transparente? Esquematize a montagem experimental e escreva as equações pertinentes.
- ✓ Existem vários outros tipos de interferômetros com funcionamento similar, em muitos aspectos, ao de Michelson, tais como os interferômetros de Fabry-Perot, de Twyman-Green, de Jamin, de Mach-Zehnder, de Rayleigh, etc. Descreva e esquematize o funcionamento de dois desses outros interferômetros, evidenciando as similaridades e diferenças em relação ao interferômetro de Michelson e citando suas principais aplicações.

B5.9 BIBLIOGRAFIA

1. Phywe Systeme GmbH. *Laboratory Experiments in Physics*, 2.2.05 e 2.2.07. Göttingen, 1999.
2. J. Goldemberg. *Física Geral e Experimental*, Vol. 3. EDUSP, São Paulo, 1973.
3. S. M. Rezende. *A Física dos Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. Ed. UFPE, Recife, 1996.
4. P. H. Beeforth and H. J. Goldsmid. *Physics of solid state devices*. Pion Ltd, London, 1970.
5. F. A. Jenkins and H. White. *Fundamentals of Optics*. McGraw Hill, 1976.
6. A. C. Melisinos. *Experiments in Modern Physics*. Academic Press, NY, 1966.
7. M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*, 7th ed. Cambridge Univ. Press, 1999.
7. J. R. Meyer-Arendt. *Introduction to Classical and Modern Optics*. Prentice Hall, NJ, 1995.
8. Laboratório de Espectrofotometria e Ensino de Óptica: <http://www.ifi.unicamp.br/~accosta>.

Redação: Prof. Rogério N. Suave.