

Aparato de baixo custo para determinação da energia de *band gap* em fotoresistores

Low-cost apparatus for determining the band gap energy in photoresistors

Vitor R. Coluci^{*1}, Yuri A. Meyer¹, Herick H.M. Dos Santos¹, Talía S.S. Ximenes¹,
Ivan de Oliveira¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP, Brasil.

Recebido em 09 de junho de 2025. Revisado em 08 de dezembro de 2025. Aceito em 10 de dezembro de 2025.

A banda de energia proibida (ou *band gap*) é determinante para o funcionamento de diversos dispositivos optoeletrônicos como LEDs, diodos, transistores e células fotovoltaicas. Neste trabalho, desenvolvemos um aparato de baixo custo para determinar o *band gap* do material semicondutor usado em fotoresistores (LDR – *light dependent resistor*). O aparato usa uma rede de difração para produzir luz de diferentes comprimentos de onda que incide sobre o LDR. A curva da resistência em função da energia da luz incidente é usada para se determinar o *band gap*, como sendo a energia associada ao primeiro ponto de inflexão da curva. O valor experimental obtido diferiu em 5% do valor esperado para a liga ternária semicondutora prevista para o LDR utilizado. O aparato proposto pode ser usado no ensino superior, em disciplinas de física experimental para abordar tópicos de física do estado sólido, e também no ensino médio, para introduzir temas de física moderna.

Palavras-chave: Band gap, Semicondutor, Fotoresistor (LDR), Rede de difração, Física do Estado Sólido.

The energy band gap is crucial for operating various optoelectronic devices such as LEDs, diodes, transistors, and photovoltaic cells. In this work, we developed a low-cost setup to determine the band gap of the semiconductor material used in light-dependent resistors (LDRs). The apparatus uses a diffraction grating to produce light of different wavelengths that shines on the LDR. The curve of the electrical resistance versus the incident light energy is used to determine the band gap, defined as the energy of the first inflection point of the curve. We obtained a band gap that differed by 5% from the expected value for the ternary semiconductor alloy assumed to be used in the LDR. The proposed setup can be used in higher education experimental physics courses to address solid-state physics topics, and also in high school to introduce modern physics concepts.

Keywords: Band gap, Semiconductor, Light-dependent resistor (LDR), Diffraction grating, Solid state physics.

1. Introdução

A importância dos semicondutores na sociedade contemporânea é inegável, uma vez que eles constituem a base do funcionamento de dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos, como transistores, células solares e sensores fotônicos com aplicações tecnológicas emergentes, incluindo fotônica e energias renováveis [1, 2].

A energia de Fermi é um parâmetro fundamental na física do estado sólido e representa o nível de energia máximo ocupado pelos elétrons em um material no zero absoluto de temperatura. Nos metais, a banda de condução está parcialmente preenchida, e a energia de Fermi se encontra dentro dessa banda, o que permite a existência de elétrons livres e elevada condutividade elétrica. Já nos semicondutores, a energia de Fermi está localizada dentro do *gap* de energia, entre a banda de valência totalmente preenchida e a banda de condução vazia (em temperatura zero), o que os torna isolantes em baixas temperaturas, mas condutivos sob

excitação térmica ou óptica. Essa diferença na posição da energia de Fermi é fundamental para compreender o comportamento eletrônico distinto entre metais e semicondutores [3]. O comportamento semicondutor está fortemente ligado ao conceito de estrutura de bandas de energia e, mais especificamente, a uma região de energia onde não há níveis de energia disponíveis para serem ocupados pelos elétrons. Fundamental para a operação desses materiais, essa região é conhecida como “banda proibida” (ou *band gap* em inglês) [3–5] e que separa a banda de valência da banda de condução de um semicondutor.

Quando os elétrons da banda de valência de um semicondutor recebem energia suficiente para atingir os níveis da banda de condução, portadores de carga são gerados e, sob a ação de um campo externo, o material passa a conduzir eletricidade [3, 4]. A quantidade de energia recebida depende do tipo do semicondutor e, para os intrínsecos (como o silício e o germânio), deve ser minimamente igual à energia do *band gap*. Tal propriedade é essencial para o funcionamento de dispositivos optoeletrônicos, como LEDs, sensores e células fotovoltaicas. Dessa forma, a determinação precisa do

*Endereço de correspondência: coluci@unicamp.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

band gap é crucial para garantir o desempenho ideal desses dispositivos, pois influencia diretamente a faixa espectral de absorção e a eficiência de conversão de energia [1, 2]. Assim, a determinação do *band gap* é fundamental para a caracterização de materiais e sua aplicação tecnológica.

O *gap* fundamental (ou *band gap* eletrônico) é definido como a diferença de energia entre o topo da banda de valência e o fundo da banda de condução, considerando os estados eletrônicos reais do sistema. Além dele, tem-se o *gap* óptico que se refere à energia mínima necessária para uma transição eletrônica induzida por fótons, ou seja, envolve processos ópticos de excitação de elétrons. Devido a efeitos de ligação entre elétrons e lacunas, o *gap* óptico pode ser ligeiramente inferior ao *gap* fundamental [6, 7].

Diversos métodos têm sido utilizados para se determinar o *band gap*, desde técnicas espectroscópicas sofisticadas até abordagens mais acessíveis, baseadas na variação de propriedades elétricas com a incidência de luz [8]. Esses métodos incluem espectroscopia UV-Vis, espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X e fotoluminescência [9]. Do ponto de vista histórico e teórico, a determinação do *band gap* a partir de métodos experimentais foi consolidada com os trabalhos clássicos de Tauc, Grigorovici e Vancu [10]. No entanto, a formulação teórica básica das transições ópticas, diretas permitidas, indiretas e proibidas, foi originalmente proposta por Elliott, em 1957, no contexto da teoria de bandas [11]. Seis anos depois, Tauc, ao lado de Grigorovici e Vancu, introduziram uma abordagem semiempírica para caracterização óptica de materiais semicristalinos e amorfos, o que levou à popularização da chamada Lei de Tauc [10].

O método de Tauc baseia-se na extrapolação da região linear do gráfico $(\alpha h\nu)^{1/r} \times h\nu$, onde α é o coeficiente de absorção, $h\nu$ representa a energia do fóton incidente e r depende do tipo de transição eletrônica envolvida, por exemplo, $r = 1/2$ para transições diretas permitidas. Para transições indiretas assistidas por fônons, comuns em materiais como o silício, o valor de r usualmente adotado é 2. A intersecção da reta extrapolada com o eixo das energias permite estimar a largura de banda proibida E_g , sendo este método amplamente consolidado na literatura por sua simplicidade e aplicabilidade a dados obtidos via espectroscopia UV-Vis [12].

Neste trabalho, propomos um experimento de baixo custo para determinar o *band gap* a partir de uma adaptação do aparato desenvolvido por Oliveira Jr, Gumiero e Coluci [13], originalmente voltado à observação de padrões de difração de luz monocromática produzidos por uma fenda dupla. O aparato proposto no presente trabalho foi construído usando uma rede de difração para decompor a luz branca e um sistema automatizado para coletar a resistência elétrica de um resistor dependente de luz (fotorresistor – LDR *light dependent resistor*) no qual se incide a luz difratada. A abordagem experimental baseia-se na variação da

resistência elétrica de um fotosensor, como o LDR, quando exposto a luzes monocromáticas de diferentes energias. O *band gap* a ser determinado pelo aparato se refere ao material semicondutor que constitui o LDR, uma vez que os materiais semicondutores usados no LDR são os responsáveis pela sensibilidade à luz e, portanto, pela variação da resistência. Nessa abordagem, registra-se a resistência do LDR em função da energia da luz incidente, e o primeiro ponto de inflexão da curva resistência vs. energia é associado à energia mínima capaz de excitar elétrons da banda de valência para a de condução, isto é, ao valor do *band gap*.

A determinação do *band gap* de um LDR como indicado acima foi realizada com um aparato semelhante, mas com um custo mais elevado. Oliveira e Tessler usaram um monocromador comercial (Oriel Corp., modelo 77250, 1200 linhas/mm, R\$ 5000 (US\$ 1000)) para obter luz de diferentes comprimentos de onda [14]. O trabalho de Oliveira e Tessler pode ser visto no repositório Git do presente trabalho (veja ref. [27]). No nosso caso, usamos uma rede de difração mais simples (600 linhas/mm, R\$ 500,00 (US\$ 100,00)) e um sistema de aquisição baseado em Arduino (R\$ 50/US\$ 10) e no reuso de uma impressora matricial (R\$ 400/US\$ 80), o que permite construir o aparato em instituições que dispõem de poucos recursos para a aquisição ou construção de equipamentos didáticos.

2. Fotoresistores

Os LDRs são dispositivos fotocondutores cuja resistência elétrica diminui com o aumento da intensidade, com resposta espectral típica no visível e dinâmica fortemente dependente do material e da geometria [5, 15, 16].

LDRs também têm sido usados em vários experimentos de Física, permitindo a obtenção de uma grande diversidade de dados. Por exemplo, Oliveira Jr, Gumiero e Coluci usaram o LDR para coletar os padrões de difração do experimento da fenda dupla [13]. Macêdo, Pedroso e Costa usaram o LDR para determinar o momento de inércia de uma barra e o ponto de aterrissagem de uma esfera lançada horizontalmente de uma mesa [17]. Gutierrez *et al.* desenvolveram um sistema de fotodetecção com LDR para quantificar a potência de luz laser [18] e Lima *et al.* usaram o LDR como sensor de posição em experimentos do pêndulo simples, da queda livre e do sistema massa-mola [19]. Meyer *et al.* desenvolveram um aparato didático de baixo custo baseado em LDRs para estudar a Lei de Lambert-Beer no ensino médio, demonstrando a viabilidade de experimentos interdisciplinares envolvendo Física e Química com sensores simples e acessíveis [20].

A resistência do LDR também depende do comprimento de onda da radiação que incide sobre ele [21]. Os LDRs são constituídos basicamente de sulfeto de cádmio (CdS), de seleneto de cádmio (CdSe), ou de alguma mistura deles, devido à abrangência de resposta

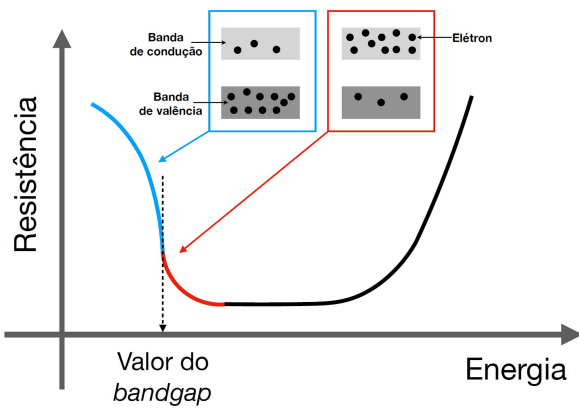


Figura 1: Gráfico típico de resistência do LDR em função da energia da luz incidente. A projeção do primeiro ponto de inflexão no eixo da energia corresponde ao valor da energia de *band gap*. O esquema na figura indica a transição de elétrons da banda de valência para a banda de condução a partir do momento em que a energia fotônica atinge o valor do *band gap*.

espectral da luz visível apresentada por esses materiais [21–23]. À temperatura ambiente, o CdS possui um *band gap* de 2.42 eV [24] enquanto o CdSe possui um *band gap* de 1.74 eV [25].

Experimentalmente, espera-se que, ao variar o comprimento de onda (ou equivalentemente a energia) da luz incidente no LDR, ocorra uma variação de sua resistência. Neste trabalho, fótons com diferentes energias foram obtidos a partir da decomposição da luz branca ao incidir sobre uma rede de difração.

Inicialmente, ao aumentar a energia dos fótons incidentes, a resistência do LDR diminui, uma vez que estes ainda não possuem energia suficiente para promover a migração dos elétrons da banda de valência para a banda de condução (Fig. 1). A partir de um determinado valor de energia, quando os fótons possuem energia suficiente para promover essa migração, a resistência diminui mais lentamente e começa a se manter constante. Com o aumento da energia fotônica, a resistência segue constante até iniciar um crescimento, que ocorre devido à absorção de luz por parte do vidro que recobre o material semiconductor do LDR [16], a qual reduz a luz efetiva sobre o LDR. Consideramos neste trabalho que o valor da energia de *band gap* está relacionado ao primeiro ponto de inflexão da curva $R(E)$ (resistência em função da energia fotônica).

3. Fundamentação teórica do critério do ponto de inflexão

Embora o método de Tauc seja o procedimento consagrado para determinação precisa do *band gap* (E_g) a partir de dados espectroscópicos, o uso do primeiro ponto de inflexão de $R(E)$ pode ser entendido como uma

aproximação operacional que marca o início da absorção interbanda em dispositivos fotocondutivos.

A resistência R_{LDR} de um LDR está relacionada à condutividade do semiconductor $\sigma = q\mu n$, na qual q é a carga do elétron, μ é a mobilidade e n é a densidade de portadores foto gerados. Em regime estacionário, n é proporcional ao coeficiente de absorção óptica $\alpha(h\nu)$ e à taxa de geração de portadores.

Na vizinhança do *band gap* direto, a teoria de bandas prediz que a absorção cresce como uma lei de potência do excesso de energia do fóton, isto é, $\alpha(h\nu) \propto (h\nu - E_g)^{1/2}$ para transições diretas permitidas, enquanto para lacunas indiretas a absorção requer fônons e é muito mais fraca. Essa descrição, apresentada de forma clássica por Yu e Cardona [8], fundamenta a linearização de Tauc em que α^2 varia linearmente com $h\nu$ e cujo intercepto fornece E_g [10].

No nosso caso, não medimos α diretamente: medimos R , que decresce quando a fotogeração de portadores aumenta. Consequentemente, a curva $R(E)$ apresenta uma transição rápida ao redor de E_g : para $h\nu < E_g$, $\alpha \approx 0$ e R varia lentamente; para $h\nu \gtrsim E_g$, α cresce como $(h\nu - E_g)^{1/2}$ e R decai mais rapidamente. Essa mudança de regime aparece como uma mudança de concavidade em $R(E)$, de modo que o primeiro ponto de inflexão (detectado pela mudança de sinal de d^2R/dE^2) atua como um marcador geométrico do início de absorção previsto pela teoria [8, 11]. Assim, o ponto de inflexão oferece um critério objetivo e reproduzível para estimar E_g em arranjos didáticos de baixo custo, ainda que com menor precisão do que abordagens espectroscópicas baseadas em $\alpha(h\nu)$.

4. Metodologia

4.1. Aparato experimental

Para a realização do experimento, adaptamos a montagem proposta por Oliveira Jr, Gumiero e Coluci [13], em que um LDR é acoplado a um motor de passo de uma impressora do tipo matricial (Fig. 2). Uma luz branca (220 V AC/ Modelo HL2250 Komlux) incide sobre uma rede de difração (600 linhas/mm – Paton Hawksley) para produzir um padrão de difração formado por um contínuo de cores. A luz branca deve fornecer uma intensidade razoável para produzir o padrão com intensidade suficiente para levar a uma variação detectável da resistência do LDR. Um sistema de lentes para colimar a luz, como o usado neste trabalho, também permite melhorar o padrão obtido. Apesar de seu custo relativamente elevado (R\$ 6000/US\$ 1200) quando comparado aos outros equipamentos do aparato, o equipamento usado neste trabalho para produzir a luz branca é geralmente encontrado em laboratórios didáticos ou de ótica e podem ser aproveitados. Outras fontes como lâmpadas incandescentes podem ser usadas, caso fontes mais sofisticadas não estejam disponíveis.

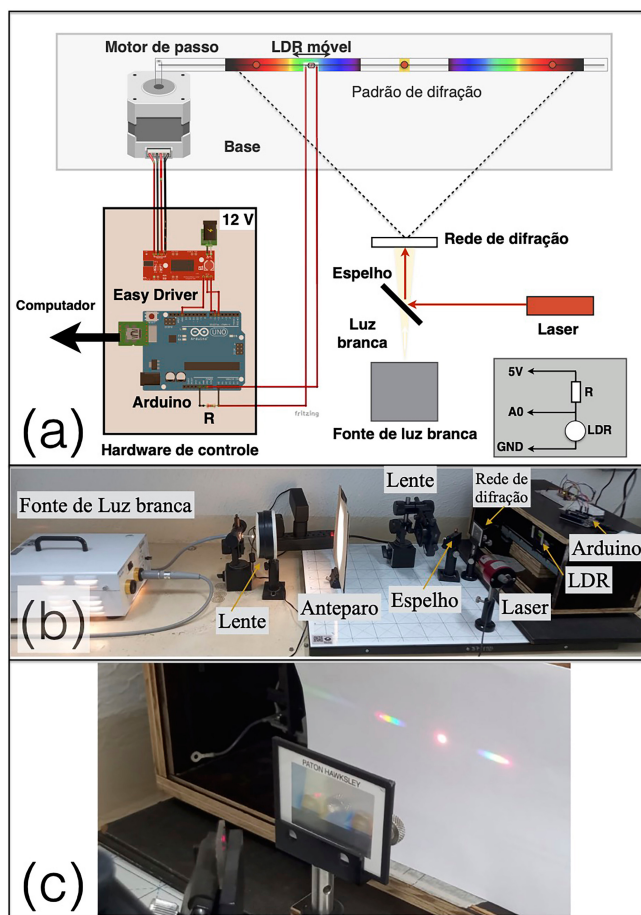


Figura 2: (a) Esquema do aparato experimental proposto. Os padrões de difração da luz branca e do laser estão ilustrados no topo da figura (os picos de difração do laser estão indicados como círculos vermelhos). O espelho e o laser se encontram abaixo do feixe da luz branca e são usados somente no processo de calibração. O circuito de ligação do LDR no Arduino é mostrado no detalhe. O resistor R é ligado em série com o LDR, formando um divisor de tensão. (b) Foto do aparato experimental completo. (c) Detalhe do padrão de difração produzido pela luz branca que incide sobre a rede de difração.

A luz do padrão de difração produzido (Fig. 2 (c)) é coletada por um LDR (modelo GL5528, 5 mm de diâmetro) que se desloca horizontalmente ao longo deste padrão. Esse deslocamento é feito sobre um eixo de uma impressora matricial (Epson LX-300+II) que não estava mais em uso, por meio de um motor de passo bipolar. Existem modelos similares a esse motor de passo tais como o NEMA 17, que podem ser encontrados com facilidade em lojas de componentes eletrônicos e plataformas de comércio on-line, com custo relativamente acessível (média de R\$80). Essa opção pode manter a proposta experimental viável e acessível, sem depender de componentes reaproveitados. A opção pelo reaproveitamento de impressora antiga deve-se à disponibilidade do sistema de transmissão do movimento presente, necessário para mover o LDR. Na ausência da

impressora, esse sistema poderia ser produzido usando, por exemplo, impressoras 3D.

O movimento do LDR e a aquisição das medidas da tensão elétrica sobre o LDR são controlados por uma placa microcontroladora Arduino UNO via comunicação serial. O LDR é um sensor analógico de 10 bits, com valores entre 0 e 1023 [26]. A placa microcontroladora coleta esses valores, converte-os para a unidade de tensão elétrica e depois calcula a resistência do LDR. A resistência do LDR e sua respectiva posição em passos do motor de passo são enviados pela placa para o computador. No computador, esses dados são visualizados por meio de uma aplicação Python que coleta os dados da porta serial e os exibe num gráfico. Essa aplicação é particularmente útil para os ajustes do experimento, em que necessita-se visualizar os dados logo após as coletas. O código dessa aplicação está disponível na plataforma Github [27].

A exposição da luz sobre o LDR foi limitada para reduzir a captura simultânea de múltiplos comprimentos de onda, contribuindo para o aumento da resolução espectral das medidas. Para isso, um anteparo opaco com uma fenda de 0.2 mm de largura foi colocado na frente do LDR (Fig. 3). Inicialmente, utilizamos uma fita adesiva isolante preta para delimitar a área de exposição (Fig. 3(b)). No entanto, essa escolha se mostrou menos apropriada por levar a uma resolução menor (ver Fig. 5).

Para validarmos o aparato proposto, comparamos o valor do *band gap* obtido com o esperado para o LDR usado. O valor esperado foi estimado a partir da composição do LDR, obtida por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Para isso foi usado o módulo Bruker XFlash 630M (área ativa de 30 mm² e resolução de 129 eV) e um LDR similar ao usado no experimento. A fabricação em larga escala dos LDRs pode levar a

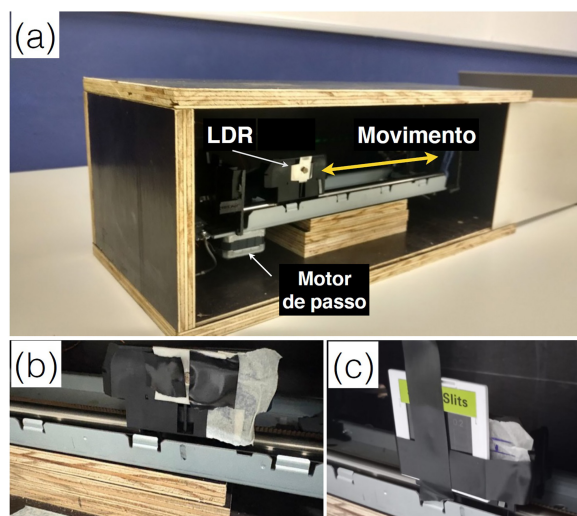


Figura 3: (a) Detalhe do aparato experimental mostrando o LDR acoplado à peça móvel de uma impressora matricial. (b) LDR parcialmente coberto por uma fita isolante preta. (c) LDR parcialmente coberto por um anteparo opaco com uma fenda de 0.2 mm de largura.

variações em suas composições e, consequentemente, no valor do *band gap* do material usado no LDR. Essa variação, no entanto, é esperada não ser grande o suficiente para alterar significativamente o *band gap*.

4.2. Calibração

Uma calibração do aparato foi realizada para obter a relação entre o comprimento de onda (ou a energia) da luz incidente sobre o LDR e sua posição (em passos) no eixo da impressora. Um laser ($653 \pm 4 \text{ nm}/5\text{V}/200 \text{ mA}/5 \text{ mW}$) foi usado na calibração, sendo sua luz direcionada para a rede de difração por meio de um espelho plano comum de refletividade de aproximadamente 90%. A variação da resistência do LDR em função da luz do padrão de difração produzido foi determinada pelo sistema de coleta com o Arduino.

Para uma rede de difração com espaçamento de rede d , os picos de difração de ordem m ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) aparecem num plano perpendicular à direção horizontal da luz monocromática incidente, de comprimento de onda λ . Esses picos se encontram nas posições dadas pelo ângulo θ_m , $d \sin \theta_m = m\lambda$, que é o ângulo entre a direção horizontal e a reta que liga o centro da rede de difração com o ponto no plano vertical correspondente pico de ordem m (p. 113, [28]). Se L é a distância entre a rede de difração e o plano e y_m é a distância ao longo do plano entre o pico de ordem 0 e o pico de ordem m ($m = 1, 2, \dots$), então $\tan \theta_m = y_m/L$. Para a condição de Fraunhofer, onde os raios que emergem da rede e atingem um ponto do plano são aproximadamente paralelos, temos que $\sin \theta_m \simeq \theta_m$ e $\tan \theta_m \simeq \theta_m$. Assim, $y_m d/L = m\lambda$, ou seja, $y_m = m\lambda L/d$. Para $m = 1$, $y_1 = (L/d) \lambda$. O valor y_1 corresponde à distância (em passos) do pico de ordem zero ao pico de primeira ordem. Para um valor conhecido de λ , podemos obter o fator de conversão $f_c \equiv d/L$ e relacionar o comprimento de onda (ou a energia) com a posição (em passos) do LDR.

A calibração também foi usada para alinhar o aparato e, com isso, garantir que o número de passos entre o pico de ordem zero de difração estivesse equidistante dos picos de primeira ordem.

4.3. Compensação da intensidade da fonte de luz branca

Idealmente, no aparato proposto, para se determinar o *band gap* do material semiconductor do LDR, este deveria ser excitado com fótons de diferentes cores (comprimentos de onda/energia) e com a mesma quantidade para cada uma das cores. No entanto, a luz branca que produz o contínuo de cores coletado pelo LDR possui um espectro não uniforme, com o número de fótons (intensidade) que depende do comprimento de onda. Esse espectro foi obtido com um espectrômetro de alta resolução (modelo HR-4XR200-5, grade H33-300 LPMM blazed 200, fabricante OceanOptics). A Fig. 4 apresenta o espectro da luz branca usada antes e depois

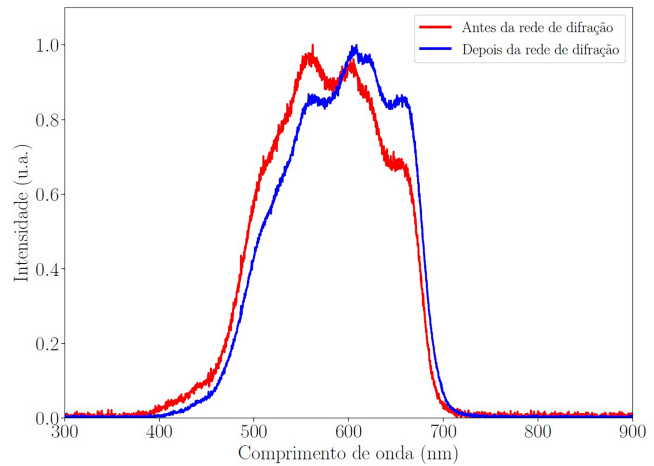


Figura 4: Espectro da luz branca usada no aparato antes e depois de passar pela rede de difração.

de passar pela rede difração. O espectro da luz após passar pela rede de difração (I_{branca}), usado no processo de compensação, foi obtido na região do pico de ordem zero (central) do padrão produzido (ver Fig. 2(c)).

Como a quantidade de portadores no LDR que serão excitados pelos fótons da luz incidente depende da intensidade, é preciso levar em conta o espectro da luz branca na resposta do LDR. Esse espectro (I_{branca}) é usado para compensar a resposta do LDR, medida aqui pela resistência do LDR. Essa compensação é necessária para que a resposta apresentada seja a resultante da energia do fóton incidente e não da quantidade de fótons (intensidade).

De acordo com as especificações do LDR [21], sua resistência R_{LDR} varia de forma não linear com a iluminância, a qual é proporcional à intensidade I da luz, como $R_{\text{LDR}} \sim I^{-a}$, onde a é um parâmetro especificado pelo fabricante do LDR [21]. Normalizando I com a intensidade da luz branca incidente, $I \rightarrow I/I_{\text{branca}}$, a resistência R é transformada para $R_{\text{LDR}} \rightarrow \tilde{R} \sim (I/I_{\text{branca}})^{-a} \sim (R_{\text{LDR}}^{-1/a}/I_{\text{branca}})^{-a}$, ou ainda, $\tilde{R} \sim R_{\text{LDR}}/(I_{\text{branca}})^{-a}$. A quantidade $\tilde{R}$ (de unidades arbitrárias) traz a compensação da quantidade de fótons para a resposta do LDR e, portanto, sua variação com a energia fotônica será usada para determinar o *band gap* do LDR.

4.4. Estimativa das incertezas

O *band gap* determinado pode estar sujeito a algumas fontes de erro inerentes ao aparato utilizado. Por exemplo, a precisão da rede de difração empregada (600 linhas/mm) pode introduzir erros na determinação do comprimento de onda da luz incidente. A calibração baseada em um único laser (650 nm) pode não garantir linearidade em toda a faixa espectral analisada, afetando a conversão de distância em energia, a sensibilidade espectral do próprio LDR, que não é perfeitamente

uniforme, pode introduzir desvios na medida. Finalmente, a dispersão da luz branca e possíveis reflexões internas no aparato também podem influenciar a intensidade da luz que efetivamente incide sobre o LDR, afetando a forma da curva $\tilde{R}(E)$.

A incerteza na medida de R_{LDR} ($\tilde{R}$) foi estimada a partir do desvio padrão da média ($\Delta\tilde{R}$), obtido da repetição das medidas sob as mesmas condições do experimento. A incerteza Δf_c , associada ao fator de conversão f_c , foi obtida por $(\Delta f_c/f_c)^2 = (\Delta\lambda/\lambda)^2 + (\Delta y_1/y_1)^2$, onde $\Delta\lambda$ e Δy_1 são as incertezas no comprimento de onda da luz incidente e na distância entre o pico de ordem zero e o pico de primeira ordem. $\Delta\lambda$ foi considerado como largura à meia altura (4 nm) do pico do laser obtido pelo espectrômetro de alta resolução. Δy_1 foi considerado como a largura do mínimo correspondente ao pico de difração de primeira ordem do laser.

5. Resultados e Discussões

5.1. Calibração

A resistência do LDR quando exposto a luz laser em função de sua posição (em passos) é mostrada na Fig. 5. Podemos observar 3 mínimos da resistência que correspondem aos picos de difração. O mínimo próximo ao passo 2000 corresponde ao pico de ordem zero da difração, enquanto que os outros correspondem aos picos de primeira ordem ($m \pm 1$). A partir desses mínimos, obtivemos o fator de conversão (f_c) que relaciona o comprimento de onda e a distância medida em passos.

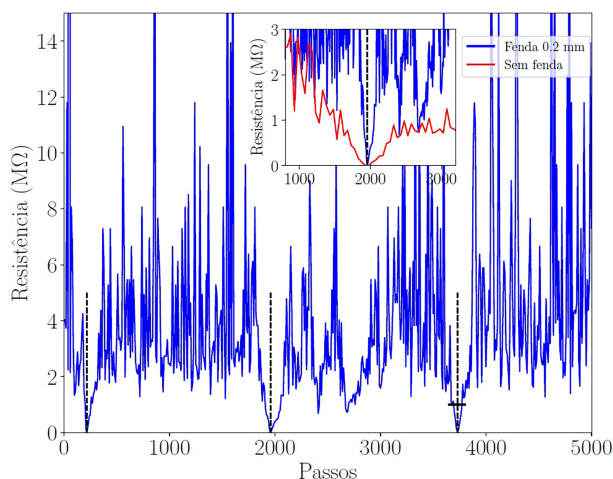


Figura 5: Curva de calibração do aparato. Os pontos de mínimo da curva (linhas tracejadas verticais) indicam grande quantidade de luz e correspondem aos picos de difração de ordem zero ($m = 0$) e de primeira ordem ($m = \pm 1$). A linha horizontal indica a região onde foi estimada a incerteza do fator de conversão. O gráfico interno compara as curvas de calibração obtidas cobrindo parcialmente o LDR com uma fita isolante (Fig. 3(b)) e com uma fenda de 0.2 mm de largura (Fig. 3(c)).

Para a configuração usada do aparato (distância entre a rede de difração e o LDR), f_c foi de 0.37 nm por passo.

Para determinar a incerteza no fator de conversão, estimamos Δy_1 como sendo ~ 80 passos, a largura do mínimo correspondente ao pico de difração de ordem +1 da Fig. 5 para uma resistência de 1 MΩ, a qual corresponde aproximadamente à meia altura do mínimo. Considerando $y_1 = 1770$ passos e $\lambda = (653 \pm 4)$ nm, $\Delta f_c = 0.02$ nm/passos. A incerteza do comprimento de onda obtido pelo aparato ($\Delta\lambda_a$) pode ser estimada como sendo o equivalente em nm da largura à meia altura do mínimo correspondente ao pico de difração de ordem 1, ou seja, $80 \text{ passos} \times 0.37 \text{ nm/passos} = 30 \text{ nm}$. Como $E(\text{eV}) = 1240/\lambda_a(\text{nm})$, então $\Delta E = 1240 \Delta\lambda_a/\lambda_a^2$. Para λ_a sendo o laser usado na calibração, temos que $\Delta E = 0.086 \simeq 0.1$ eV. A incerteza ΔE pode ser considerada a resolução espectral do aparato e será usada como a estimativa da incerteza para o valor do *band gap*, determinado como o primeiro ponto de inflexão de $R(E)$ do LDR.

5.2. Determinação do *band gap*

Após a coleta da resistência do LDR para o padrão contínuo de cores em função do número de passos, calculamos a distância (em passos) entre o pico de ordem zero e a posição correspondente a cada valor da resistência. A energia do fóton incidente é então determinada usando o fator de conversão obtido no processo de calibração.

A variação da resistência do LDR (R_{LDR}) com a energia da luz incidente obtida com o aparato proposto é mostrada na Fig. 6 (a). O comportamento é similar ao da Fig. 1. Podemos notar, inicialmente, que a resistência diminui, segue constante e depois aumenta. Na Fig. 6 (b) temos o comportamento de $\tilde{R}$. Esse comportamento foi suavizado pelo método *Bspline* quadrático (curva preta, função `interp1d` do Python) e a segunda derivada da curva suavizada é apresentada em (c).

O primeiro ponto de inflexão na região de interesse (mudança do sinal da segunda derivada) é indicado na Fig. 6 (c) e ocorre em 1.9 ± 0.1 eV. Esse valor é próximo ao de 1.7 eV, obtido por Oliveira e Tessler [14], e ao *band gap* do seleneto de cádmio (CdSe, 1.74 eV)[30], um dos materiais semicondutores usados em LDRs. No entanto, as especificações encontradas em *datasheets* [21–23] de LDRs indicam que esses dispositivos são compostos de CdS, o que levaria a um *band gap* de 2.4 eV. Devido a essa indefinição, determinamos a composição de um LDR similar ao usado no aparato, empregando a técnica EDS para verificar qual o material semiconductor usado no LDR. A análise da composição confirmou a presença simultânea dos elementos cádmio (Cd), enxofre (S) e selênio (Se) (Fig. 7), o que indica uma mistura de CdS e CdSe por meio de uma liga semicondutora ternária do tipo $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$.

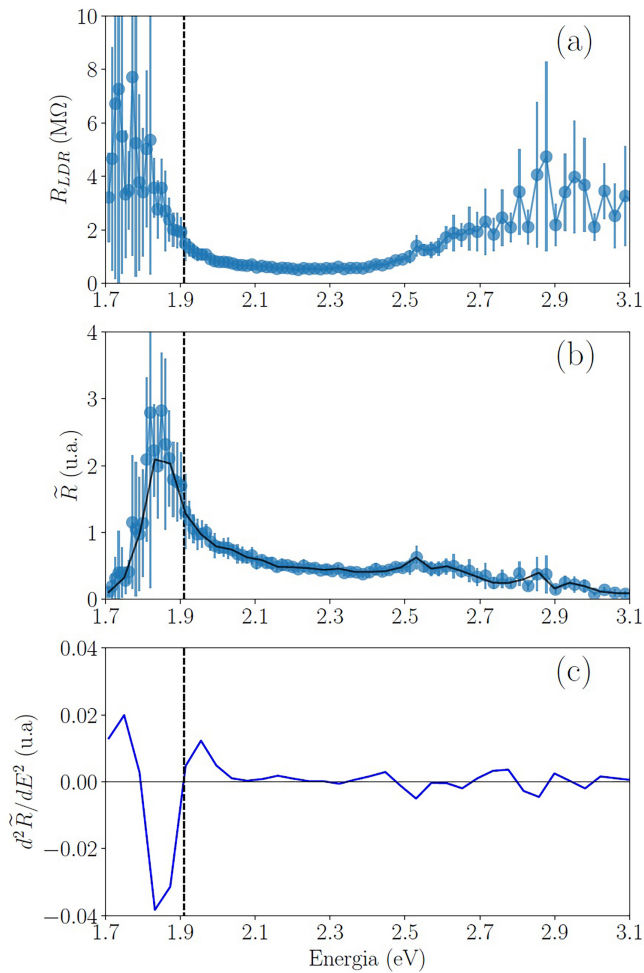


Figura 6: (a) Comportamento da resistência do LDR (R_{LDR}) em função da energia (E) da luz incidente. Esse comportamento foi obtido a partir de 10 medidas independentes para cada energia. As linhas verticais indicam o desvio padrão da média. (b) Comportamento da resistência normalizada ($\tilde{R}$) do LDR em função da energia da luz incidente. A curva preta indica uma suavização da curva pelo método de *Bspline*. (c) Segunda derivada ($d^2 \tilde{R} / dE^2$) em função da energia. As linhas tracejadas indicam o valor de 1.91 eV, correspondendo ao ponto de inflexão da curva $\tilde{R}(E)$.

A ocorrência dessa liga ternária é amplamente relatada na literatura, especialmente em dispositivos optoeletrônicos como fotocondutores, células solares e detectores de luz, uma vez que permite ajustar continuamente o *band gap* óptico entre os limites de CdS (2.42 eV) e CdSe (1.74 eV), otimizando o desempenho espectral do dispositivo. Por exemplo, Tivanov *et al.* [29] produziram filmes de $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ e observaram um *band gap* de 1.77 eV para $\text{CdS}_{0.15}\text{Se}_{0.85}$ e de 2.16 eV para $\text{CdS}_{0.78}\text{Se}_{0.22}$. Bibiano-Salas *et al.* caracterizaram filmes de $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ produzidos pela técnica de ablação a laser e encontraram uma relação não-linear para a energia do *band gap* E_g em função da fração molar x de S [30]:

$$E_g(x) = E_g^{\text{CdSe}}(1-x) + E_g^{\text{CdS}}x - bx(1-x) \quad (1)$$

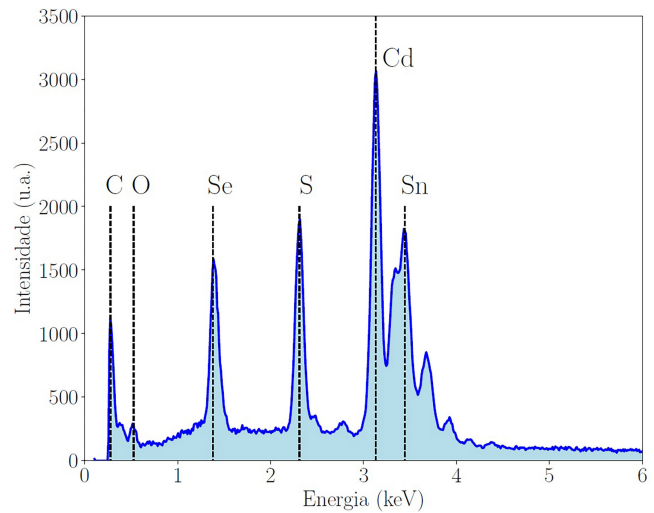


Figura 7: Espectroscopia de energia dispersiva de uma das regiões do LDR. Os picos correspondentes aos diferentes elementos estão indicados pelas linhas tracejadas.

onde E_g^{CdSe} e E_g^{CdS} são os valores do *band gap* do CdSe e CdS, respectivamente, e b é o parâmetro *bowing*. Essa expressão polinomial quadrática é geralmente usada para ajustar a variação do *band gap* de ligas semicondutoras em termos da concentração de um de seus elementos [31]. Nessa expressão, b é chamado de parâmetro *bowing* e representa o parâmetro do termo quadrático da expressão. Para a liga $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$, Bibiano-Salas *et al.* obtiveram a relação $E_g(x) = 1.70(1-x) + 2.40x - 0.23x(1-x)$ (Eq. (3) de [30]).

Para uma região do LDR, verificamos que a distribuição de átomos de Cd, S, Se e Sn é de 18.4%, 11.2%, 6.2%, e 9.8% respectivamente. Imagens de EDS (não mostradas aqui) indicam que o Sn não se localiza na mesma região da liga ternária acima indicada e, portanto, deve ter um papel secundário no valor do *band gap*. Desse dados, podemos estimar $x = 11.2 / (6.2 + 11.2) = 0.64$ e, portanto, esperar a presença da liga $\text{CdS}_{0.64}\text{Se}_{0.36}$. Para essa liga, a expressão (1) [30] resulta em $E_g = 2.095$, próximo ao valor aqui obtido de 1.9 ± 0.1 eV. Essa diferença de 5% entre eles é relativamente pequena dadas as possíveis fontes de erro para o aparato de baixo custo proposto aqui. Dessa forma, consideramos que o valor determinado neste trabalho está de acordo com o valor esperado para o LDR usado.

6. Conclusões

Desenvolvemos um aparato de baixo custo capaz de determinar a banda de energia proibida de fotoresistores com base na variação da resistência elétrica em função da energia da luz incidente. A metodologia proposta se mostrou válida, apresentando um valor experimental do *band gap* em acordo com o valor estimado por análises da composição do LDR e de dados de espectroscopia.

O aparato proposto representa uma alternativa acessível às técnicas tradicionais baseadas em espectroscopia óptica, podendo ser utilizado em contextos pedagógicos.

Além de seu valor didático, o experimento permite a introdução de conceitos fundamentais de Física do Estado Sólido, Física Moderna e instrumentação em ambientes de ensino. A montagem envolve princípios de óptica, eletricidade, eletrônica e análise de dados experimentais, oferecendo uma oportunidade interdisciplinar para o desenvolvimento de habilidades científicas em estudantes do Ensino Médio e Superior.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a bolsa do Serviço de Apoio ao Estudante (SAE)/UNICAMP dada a Herick Marçal. Gostaríamos de agradecer também à Dra. Josiane Aparecida de Souza Vendemiatti pelas medidas de espectroscopia de dispersão de energia realizadas no Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Tecnologia/Unicamp, ao Guilherme R. Guimarães pelas contribuições no estágio inicial do trabalho e ao Prof. Leandro Tessler da Unicamp pelas discussões do trabalho. Agradecemos também ao Prof. Luiz Antonio de Oliveira Nunes da USP/Oficiência por fornecer os códigos iniciais de visualização em Python. Finalmente, agradecemos também aos revisores do trabalho, cujos comentários levaram a uma melhoria do trabalho aqui proposto.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi disponibilizado no repositório de dados de pesquisa da Unicamp (REDU) em <https://doi.org/10.25824/redu/IHXY6L> no dia 5/2/2026.

Referências

- [1] A. Kumar, A. Thorbole e R.K. Gupta, *Materials Science in Semiconductor Processing* **185**, 108943 (2025).
- [2] C.P.C.V. Bernardo, R.A.M. Lameirinhas, J.P. de Melo Cunha e J.P.N. Torres, *Discover Applied Science* **6**, 316 (2024).
- [3] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2005), 5 ed.
- [4] R. Eisberg e R. Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles* (Wiley, New York, 1984), 2 ed.
- [5] S.M. Sze e K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, New York, 2006), 3 ed.
- [6] J.L. Brédas, *Mater. Horiz.* **1**, 17 (2014).
- [7] L. Kronik, T. Stein, S. Refaely-Abramson e R. Baer, *Journal of Chemical Theory and Computation* **8**, 1515 (2012).
- [8] P.Y. Yu e M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (Springer, Berlin, 2010), 4 ed.
- [9] N.F. Mott e E.A. Davis, *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials* (Oxford University Press, Oxford, 2012), 2 ed.
- [10] J. Tauc, R. Grigorovici e A. Vancu, *Physica Status Solidi (b)* **15**, 627 (1966).
- [11] R.J. Elliott, *Physical Review* **108**, 1384 (1957).
- [12] M. Fox, *Optical Properties of Solids* (Oxford University Press, Oxford, 2001).
- [13] C.G. de Oliveira Jr, M.R. Gumiero e V.R. Coluci, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200006 (2020).
- [14] L.F.L. de Oliveira e L.R. Tessler, *Estudo da banda de gap em componentes eletrônicos semicondutores* (UNICAMP, 2003).
- [15] R.H. Bube, *Photoconductivity of Solids* (Wiley, New York, 1960).
- [16] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors* (Springer, Cham, 2016), 5 ed.
- [17] J.A. Macêdo, L.S. Pedroso e G.A. Costa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e5403 (2018).
- [18] H.G. Gutierrez, M.S. Ribeiro, L.A.A. Pereira, G.K. Cruz, R.F. Turchiello e S.L. Gómez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3501 (2017).
- [19] N.M. Costa Lima, L.A. Silva Nunes, L.A. Casillo, A.P. Silva e R.F.M. Alves, *Pesquisa em ensino de física* (Atena Editora, Ponta Grossa, 2019).
- [20] Y.A. Meyer, E.L. Souza, L.F. Ávila, G.G. Artero, J.I. Borges, J.R. Santos e L.C.S. Costa, *Revista de Estudos Aplicados em Educação* **3**, 58 (2018).
- [21] *Datasheet do LDR modelo GL5528 (fabricante ETC2)*, disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1131893/ETC2/GL5528.html>, acesso em: 20/05/2025.
- [22] *Datasheet do LDR modelo PGM5526 (fabricante Token)*, disponível em: <https://www.tme.eu/Document/c93f2131e72ed20d433c8f1c5d3004c0/PGM%20series.pdf>, acesso em: 20/05/2025.
- [23] *Datasheet do LDR modelo NSL-19M51 (fabricante Silonex)*, disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/77395.pdf>, acesso em: 20/05/2025.
- [24] M. Ichimura, F. Goto e E. Arai, *Journal of Applied Physics* **85**, 7411 (1999).
- [25] A. Sobhani e M. Salavati-Niasari, *Advances in Colloid and Interface Science* **287**, 102321 (2021).
- [26] E. Hecht, *Optics* (Pearson, Boston, 2017), 5 ed.
- [27] Os programas do Arduino (.ino) e e em Python (.py) usados para realizar e visualizar as medidas podem ser obtidos em <https://github.com/vitorcoluci/bandgap>.
- [28] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física* (Pearson Addison Wesley, São Paulo, 2009), 14 ed.
- [29] M. Tivanov, E. Ostretsov, N. Drozdov, L. Survilo, A. Fedotov, Y. Trofimov e A. Mazanik, *Physica status solidi (b)* **244**, 1694 (2007).
- [30] L.A. Bibiano-Salas, L.A. Martínez-Ara, P. Maldonado-Altamirano, M.A. Hernández-Pérez, J. Sastré-Hernández e J. Santoyo-Salazar, *Materials Research Express* **12**, 055902 (2025).
- [31] T. Sandu e R.I. Iftimie, *Solid State Communications* **150**, 888 (2010).