

RELATÓRIO FINAL – F 809  
(Instrumentação para Ensino)

ESTUDO DA BANDA DE GAP  
EM COMPONENTES  
ELETRÔNICOS SEMICONDUTORES

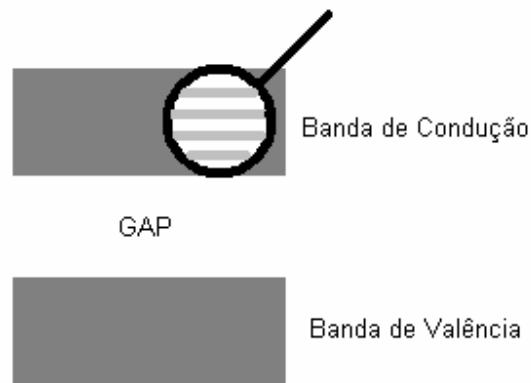
Luis Fernando Lamas de Oliveira      RA 993963  
Orientador: Prof. Leandro Russovski Tessler

## INTRODUÇÃO

A descoberta e o emprego dos materiais semicondutores na eletrônica possibilitou significativos avanços tecnológicos, por causa das suas propriedades específicas: controle das propriedades elétricas por dopagem ou aplicação de um campo elétrico, sensibilidade à luz, possibilidade de emitir luz.

Os elétrons ligados a um átomo, só podem existir em alguns valores discretos de energia de ligação com o núcleo. No entanto, em um sólido cristalino, devido ao grande número de átomos envolvidos, teremos vários desses valores discretos espaçados de valores muito pequenos entre si. Isso forma uma banda, ou seja, pode ser entendido como uma faixa contínua de valores que o elétron pode ter. Isso da origem às bandas de condução e de valência, sendo que a banda de condução é onde estão localizados os elétrons responsáveis pela condução de corrente elétrica, e a banda de valência pode ser entendida aqui, como um “reservatório” de elétrons. À distância em energia entre essas duas bandas, damos o nome de GAP.

Nos materiais condutores, a energia do GAP é nula, ou muito baixa, sendo que elétrons possam facilmente passar para a banda de condução e estabelecer uma corrente. Nos materiais isolantes, essa banda é bastante larga, o que dificulta essa passagem e por consequência, a corrente.



Nos materiais semicondutores a distância entre essas bandas tem um valor intermediário. Isso os dá a característica de serem, normalmente isolantes, mas sob alguma ação externa, como temperatura, iluminação ou campo elétrico, passam a conduzir. Isso se deve ao fato de o material ter seu nível de Fermi no GAP, entre uma banda de valência, com muitos elétrons disponíveis, e uma banda de condução, com poucos elétrons. Os agentes externos devem proporcionar aos elétrons energia suficiente para passar da banda de valência à banda de condução.

Outro conceito importante a ser explorado é o fato da luz poder ser descrita como pacotes discretos de energia bem determinadas, os quanta de energia, conforme explicado pelo efeito fotoelétrico. Iluminando um componente fotossensível com diferentes comprimentos de onda, determinaremos qual é a energia que separa a banda de condução da banda de valência do material, o GAP.

Existem diversos componentes eletrônicos no mercado, de diferentes funções e diferentes níveis de complexibilidade em seu princípio de funcionamento. O mais simples e mais interessante para nosso propósito é o LDR (Light Dependent Resistor), que é um componente de baixo custo que tem a característica de mudar a sua resistência elétrica proporcionalmente à quantidade de luz que incide sobre ele. Ele pode ser construído de diversos materiais diferentes, mas os materiais mais utilizados estão mostrados na tabela abaixo: [6]

<b>Nome do Semicondutor</b>	<b>GAP em eV (300K)</b>
Sulfeto de Cadmio (CdS)	2.4
Fosfeto de Cadmio (CdP)	2.2
Seleneto de Cadmio (CdSe)	1.7
Arseneto de Galio (GaAs)	1.4
Silício (Si)	1.1
Germanio (Ge)	0.7
Arseneto de Índio (InAs)	0.43
Sulfeto de Chumbo (PbS)	0.37
Telureto de Chumbo (PbTe)	0.29
Seleneto de Chumbo (PbSe)	0.26
Índio Antimonide (InSb)	0.23

Tabela 1 – Materiais utilizados em Fotorresistências

O LDR consiste simplesmente do material semicondutor na sua forma pura, protegido por um invólucro transparente a quase todas as cores do visível, de modo que a luz possa ser absorvida por ele. Fótons com energia maior que a energia de GAP fazem com que elétrons da banda de valência passem para a banda de condução, aumentando a quantidade de portadores. Macroscopicamente detecta-se uma diminuição na resistência elétrica do componente. Para fótons de energia menor que a do GAP, isso não ocorre, pois os fótons não conseguem fazer com que os elétrons passem para a banda de condução.

Sendo assim, o LDR é um componente interessante para apresentar conceitos importantes e essenciais da Física moderna, e do Estado Sólido, que são a energia associada aos comprimentos de onda, e também a banda de GAP, que é a distancia em energia da banda de valência para a banda de condução em um semiconductor.

## **DESENVOLVIMENTO TEÓRICO**

Os materiais semicondutores são sólidos covalentes que podem ser considerados isolantes no zero absoluto, pois sua banda de valência está cheia e a banda de condução está vazia. Porém, a banda proibida (GAP) é pequena o suficiente para que fatores externos como temperatura e absorção de luz, possam dar a elétrons da banda de valência energia suficiente para que estes passem para a banda de condução. Em termos macroscópicos, isso significa dizer que a resistência elétrica do material diminuirá.

No caso do LDR, estamos interessados no efeito da luz sobre o semiconductor. Iluminando-o com radiação monocromática, é possível verificar a contribuição que cada comprimento de onda dá para a redução da resistência. Devemos notar uma queda significativa dessa contribuição para comprimentos de onda com energia menor que o GAP. Em outras palavras, devemos verificar que energias menores que o GAP não são capazes de diminuir o valor da resistência.

Temos a relação de Plank:

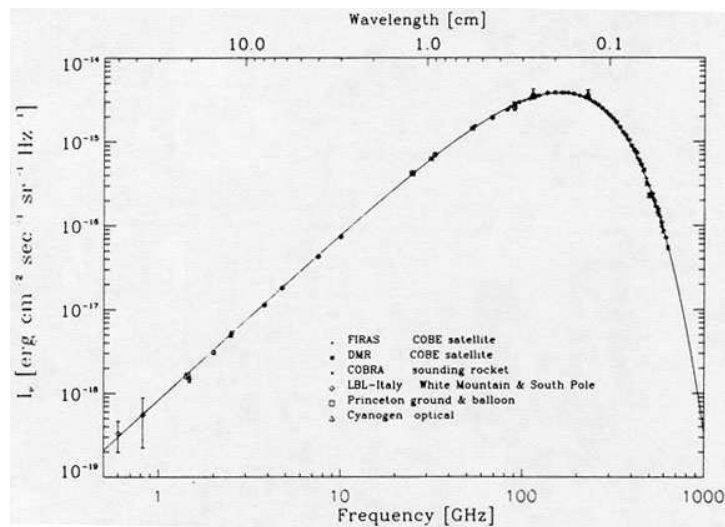
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

A partir daí, vamos calcular os comprimentos de onda de “corte” para o CdSe. Lembrando que a seu GAP de energia é igual a 1,7 eV.

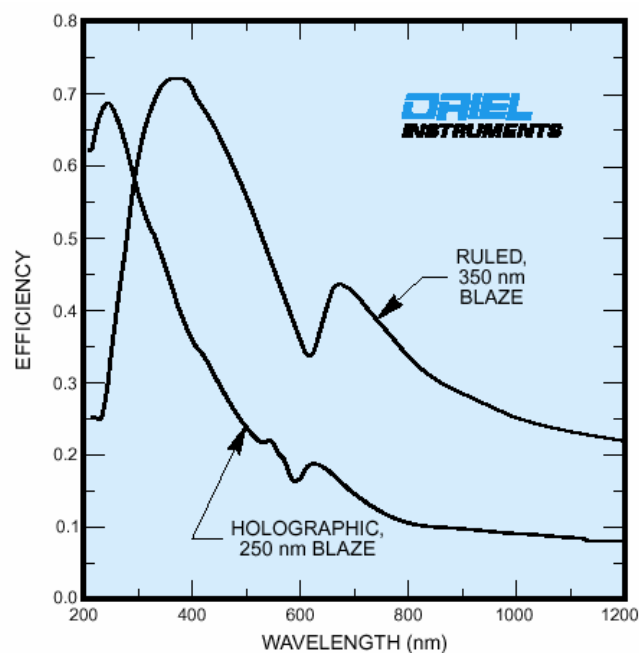
$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,7} = 728,9 \text{ nm}$$

Ou seja, devemos esperar que para comprimentos de onda maiores que esse, a resistência seja grande.

Lembrando também da emissão de radiação por um corpo negro, e que a lâmpada incandescente funciona mais ou menos igual, sabemos que a intensidade de radiação emitida em cada comprimento de onda é diferente, de acordo com o gráfico abaixo:

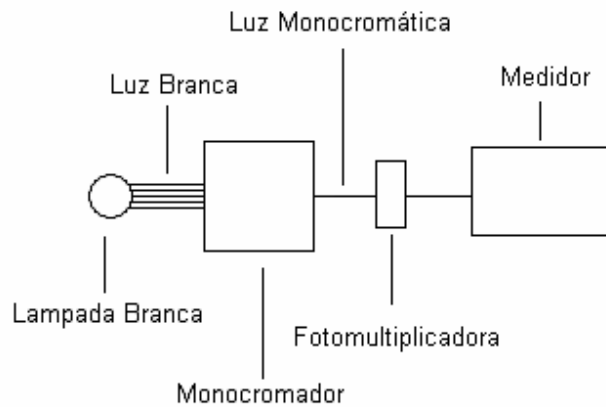


Como estaremos utilizando um monocromador a base de redes de difração, temos também que lembrar da resposta da rede em cada comprimento de onda. No caso dos nossos equipamentos utilizados, encontramos no manual que existem dois tipos de redes: Ruled e Holographic. Suas respostas estão mostradas a seguir:

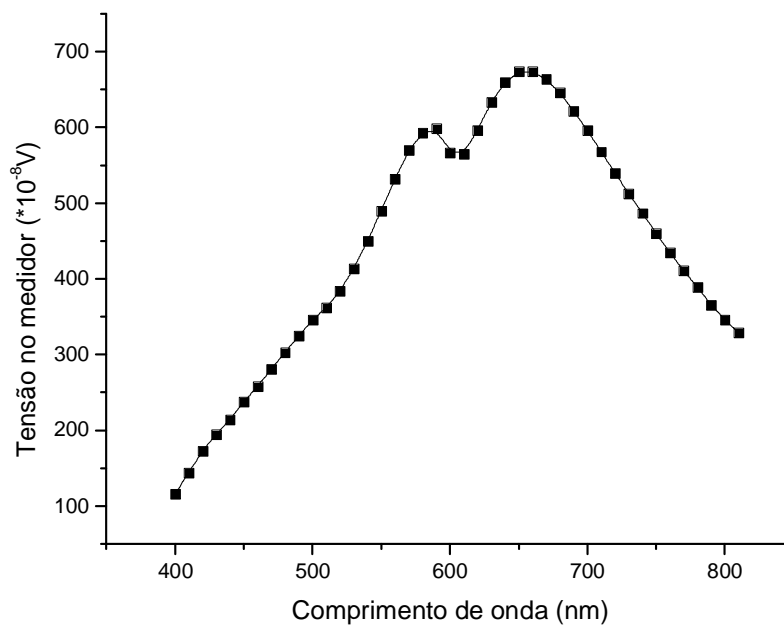


## DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Primeiro, temos que fazer a medida de calibração, ou seja, precisamos medir a intensidade de radiação em cada comprimento de onda. Para isso, montamos o seguinte setup:



Obtivemos dessa medida, o seguinte gráfico:

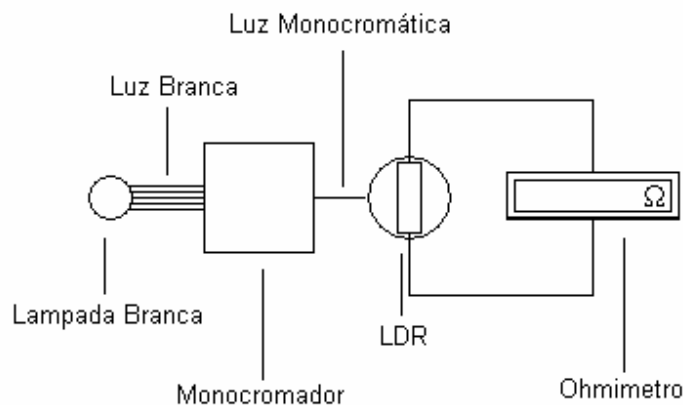


Como podemos notar, esse gráfico é a composição entre os gráficos da radiação do corpo negro e da resposta da rede de difração, conforme o esperado. Para se minimizar o erro na leitura, foi feita uma pré-verificação dos valores, de modo a ajustar o maior valor medido ao fundo da escala. Esse

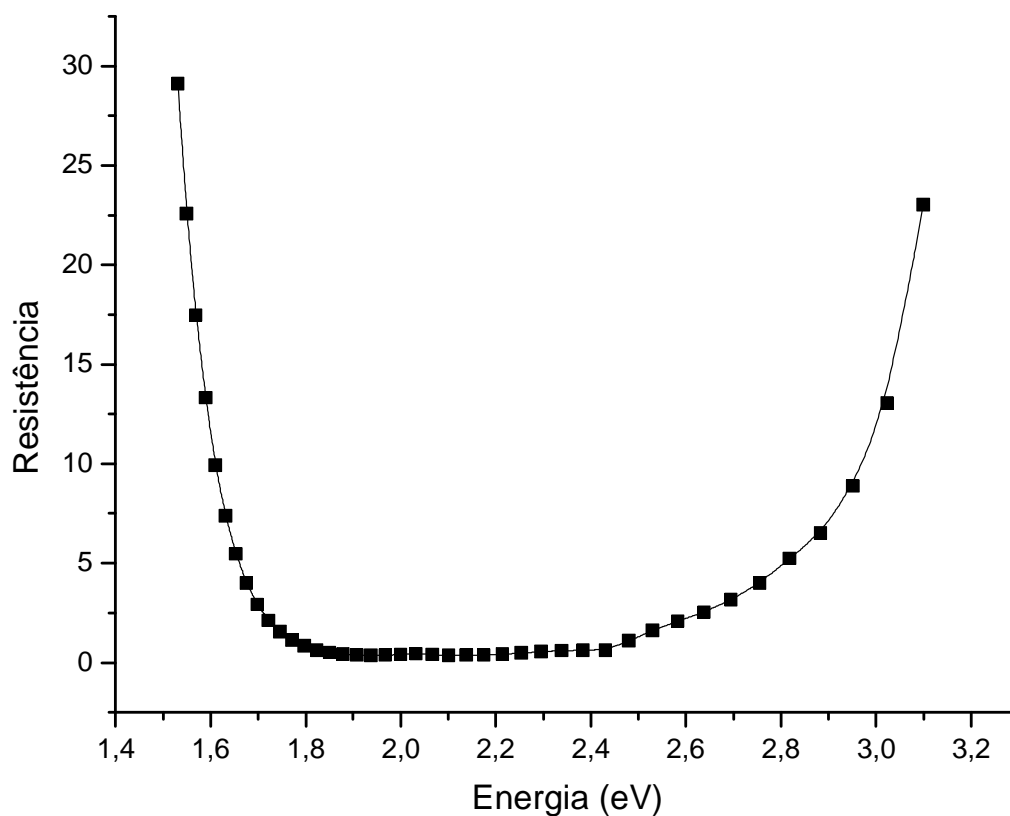


ajuste foi feito variando a abertura do diafragma na entrada da foto multiplicadora.

Agora, o próximo passo seria medir as resistências propriamente ditas. Mudamos a montagem para a descrita abaixo:



Fazendo novamente as medidas para diversos comprimentos de onda, e fazendo também a compensação dos valores de intensidade, encontramos uma resposta de acordo com o mostrado a seguir. Observamos, na direita um aumento inesperado na resistência. Isso acontece devido a absorção de luz pelo vidro que protege o semiconductor. Na região entre 2,6 eV e 1,8 eV, verificamos que a resistência permanece aproximadamente constante, ou seja, todos esses comprimentos de onda são capazes de fazer elétrons irem para a camada de condução, e abaixo de 1,7, temos um novo aumento na resistência, dessa vez devido a energia insuficiente dos fótons para fazer com que os elétrons passem para a banda de condução. Nota-se que isso ocorre aproximadamente em 1,7 eV, então, voltando a tabela 1, concluímos que o material em questão é o Seleneto de Cádmio (CdSe).

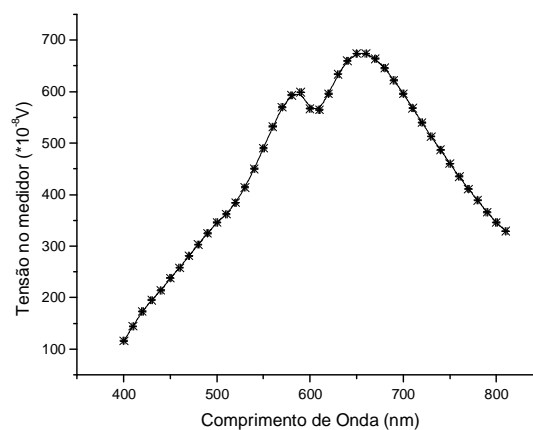


## TRATAMENTO DE ERROS

Vamos agora fazer um estudo sobre os erros associados às medidas, e rerepresentar os gráficos com as suas respectivas barras de erro. No primeiro caso, as medidas feitas foram da tensão na fotomultiplicadora, pelo sistema de detecção e do comprimento de onda, no DIAL do monocromador.

Olhando nos manuais do fabricante, encontramos que no caso do sistema de detecção, o erro é de uma unidade. Como o display é digital, não associamos mais nenhum erro a essa medida. No caso do DIAL do monocromador, percebemos que poderia ser inserido um erro de leitura de 0,5 nm. Além disso, encontramos no manual que a banda passante para a rede utilizada é também de 0,5 nm. Associamos então um erro de 1 nm para as medidas de comprimento de onda.

Para esse gráfico, não foi preciso fazer nenhum cálculo de propagação desse erro. O resultado foi o seguinte:



Esse gráfico é bastante parecido com o primeiro, pois o erro é pequeno e fica difícil de se enxergar as barras de erro.

Agora, no segundo gráfico, desejamos plotar o valor da resistência dividida pela intensidade por valor de energia. Teremos o valor da medida em Ohms, no multímetro digital. O erro associado a essa medida será igual a um por cento da medida mais um para o dígito menos significativo. Como ambas

grandezas possuem erro, é preciso fazer a propagação do erro conforme abaixo:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{dR}{dI}\right)^2 \cdot \Delta I^2 + \left(\frac{dR}{dRm}\right)^2 \cdot \Delta Rm^2}$$

Onde  $I$  é a intensidade medida no detector e  $Rm$  a resistência medida no Multímetro. Mas como  $R=Rm/I$ , chegamos :

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{-Rm}{I^2}\right)^2 \cdot \Delta I^2 + \left(\frac{1}{I}\right)^2 \cdot \Delta Rm^2}$$

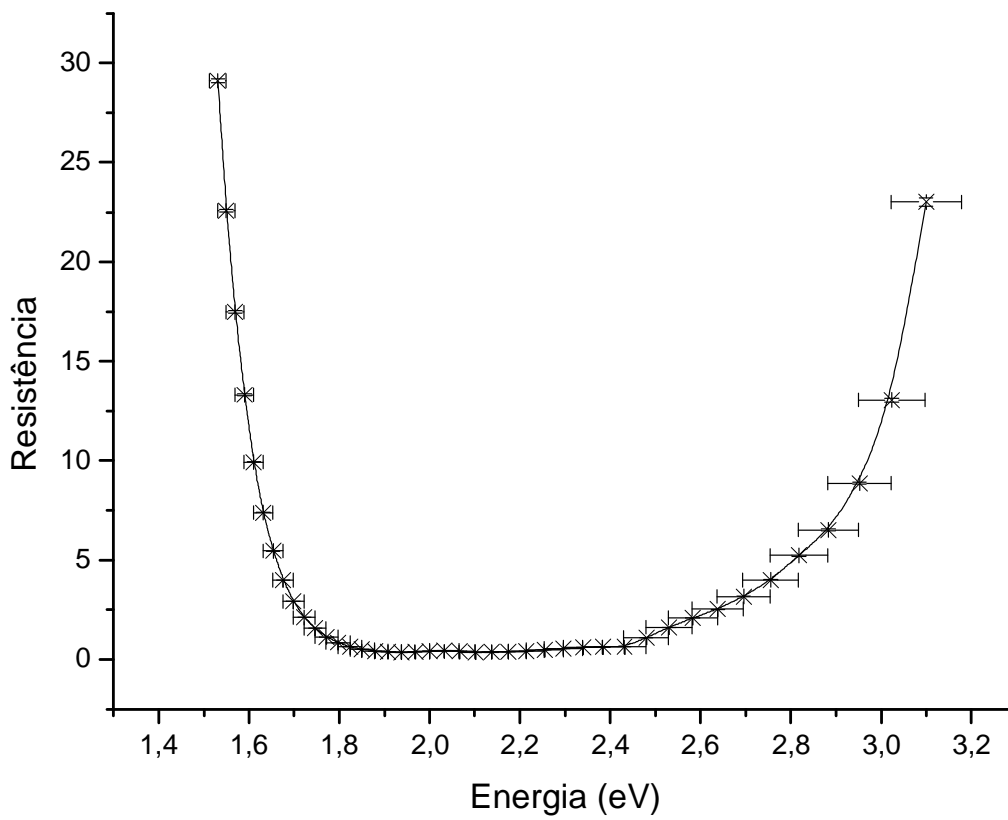
No caso da energia, temos a relação de Plank, que nos dá :

$$E = \frac{h.c}{\lambda}$$

A propagação do erro de  $\lambda$  será igual a:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{dE}{d\lambda}\right)^2 \cdot \Delta \lambda^2} = \frac{h.c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda$$

Utilizando esses valores, calculamos a barra de erros e plotamos novamente o gráfico:



Podemos observar que o valor do erro é bastante pequeno, principalmente na região onde ocorre o fenômeno. Isso nos dá segurança na determinação do material.

## **MATERIAL UTILIZADO**

O material utilizado para esse experimento, foi um conjunto de equipamentos da marca ORIEL, do Laboratório de Espectrofotometria e Ensino de Óptica. O LDR utilizado foi comprado em lojas de eletrônica da cidade de Campinas. É um componente barato e de fácil acesso. No entanto, os vendedores não têm a informação sobre o material com o qual ele é fabricado.

Os equipamentos são os seguintes:

- Monocromador Modelo 77250
- Fonte de Tensão Variável Modelo 68735
- Sistema de Detecção Modelo 7070
- Fotomultiplicadora Modelo 70680
- Lâmpada Branca Modelo 66172
- Sistema de Lente para Focalização Modelo 71400
- Rede de difração Modelo 77297
- Multímetro Digital
- LDR

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1 – R. Eisberg, R. Resnick; Física Quântica
- 2 – D. Halliday, R. Resnick, J. Walker; Fundamentals of Physics Extended
- 3 – S. Rezende; A Física dos Materiais e Dispositivos Eletrônicos.
- 4 – J. Pankov; Optical Processes in Semiconductors
- 5 – J. J. Lunazzi; FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE ERROS  
[http://geocities.com/prof\\_lunazzi/f329/erros00.html](http://geocities.com/prof_lunazzi/f329/erros00.html)
- 6 – APPENDIX H SENSORS/TRANSDUCERS  
[http://www.thiel.edu/digitalelectronics/chapters/apph\\_html/apph.htm](http://www.thiel.edu/digitalelectronics/chapters/apph_html/apph.htm)
- 7 – R. Brenzikofer; Guia para as Disciplinas de Laboratório Básico