

Efeito termoiônico

META:

Medir a função trabalho do tungstênio.

OBJETIVOS:

Ao fim da aula os alunos deverão:

- Determinar a função trabalho do tungstênio.
- Verificar a ocorrência do efeito termoiônico.
- Entender o efeito de retificação.

PRÉ-REQUISITOS

- Conteúdo da aula 1;
- Tenham cursado ou estejam cursando a disciplina Introdução à Física da Matéria Condensada.

4.1 Introdução

Caros alunos, iniciaremos aqui a segunda parte do curso onde realizaremos experimentos relacionados com a física da matéria condensada. Neste experimento, vivenciaremos algumas propriedades de grande importância para o desenvolvimento da tecnologia que nos permeia bem como para a compreensão das propriedades da matéria.

4.2 Revisão

Sabemos que os materiais metálicos (condutores) apresentam elétrons livres para se mover e que na ausência de campos e correntes elétrica, estes elétrons descrevem um movimento desordenado assim como ocorre com as moléculas de um gás em virtude da agitação térmica. Quanto maior for a temperatura do material maior é a agitação dos elétrons e portanto maior é a sua energia. Quando os elétrons apresentarem uma energia suficientemente grande para vencer a atração dos íons positivos da rede, eles escaparão do material formando uma nuvem eletrônica próxima a superfície. A nuvem de elétrons formada na superfície do material pode ser direcionada por uma diferença de potencial e coletada por um ânodo, podemos assim verificar a intensidade da corrente termoiônica em função dos parâmetros do sistema.

O efeito termoiônico teve papel fundamental para desenvolvimento tecnológico, principalmente no início do século XX. Destacamos aqui o uso do efeito termoiônico na produção de válvulas eletrônicas usadas para desenvolvimento dos meios de comunicação como rádio, TV, telefone e para uso como retificadores e am-

plificadores de sinais elétricos. Posteriormente o uso das válvulas, em muitas destas aplicações, foram substituídas pelos diodos semi-condutores que permitiu dentre outras coisas o desenvolvimento de dispositivos mais compactos. O efeito termoiônico também pode ser observado em muitos dispositivos ainda encontrados no nosso cotidiano como por exemplo em:

- Tubos CRT (*do inglês - Cathode Ray Tube*), muito usado na segunda metade do século XX para produção de TV.
- Tubos para produção de raio X usado nos equipamentos para diagnóstico médico e no desenvolvimento de pesquisas.
- Microscópios eletrônico de varredura e de transmissão, como fonte de elétrons, possibilitando enxergarmos objetos com dimensões atômicas (~ 1), muito superior ao limite do olho humano.



Figura 4.1: foto de uma válvula. Disponível em: <http://www.eletronica.com/datasheet-de-valvulas-eletronicas>. Acesso em: 28 jan. 2012.

Válvula - São dispositivos constituídos basicamente de um tubo onde se faz vácuo com dois eletrodos como mostrado na Figura 4.1 e 4.2.

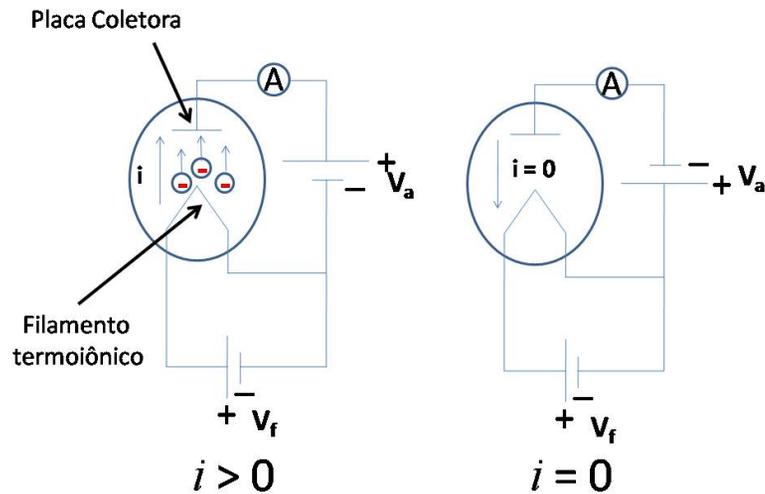


Figura 4.2: Esquema ilustrando o princípio de funcionamento de uma válvula. V_f é a voltagem aplicada ao filamento termoiônico para aquecer e liberar elétrons que são acelerados até a placa coletora pela diferença de potencial V_a .

Será necessária duas fontes para alimentar a válvula, uma é responsável pelo aquecimento do filamento usualmente de tungstênio que portanto vai dar energia para que os elétrons consiga vencer a barreira de energia superficial. A outra fonte de alimentação é usada para aplicar uma diferença de potencial entre o catodo (filamento de tungstênio) e o anodo (placa coletoras dos elétrons emitidos) direcionando os elétrons emitidos e produzindo assim uma corrente elétrica.

O **efeito termoiônico** é definido como sendo a emissão de elétrons por uma superfície metálica aquecida. Este fenômeno pode ser considerado basicamente estatístico no sentido de que o aumento da temperatura desloca a função densidade de probabilidade, colocando vários elétrons na banda de condução e portanto aptos a serem emitidos termoionicamente pelo material.

Ao fornecer energia térmica a um material, os elétrons ganham energia cinética e se a energia do elétron for superior a barreira de potencial imposta pela da superfície do material o elétrons poderão ser emitidos. Os elétrons emitidos produzem uma corrente que dependem das características do material tais como a função trabalho.

Função trabalho - É a energia mínima que devemos fornecer a um elétron para que ele possa ser arrancado do material. Em outras palavras, podemos dizer que é a energia necessária para levar um elétron desde o nível de Fermi até o nível de vácuo. Para o tungstênio este valor é de aproximadamente 4,52 eV.

A distribuição de energia dos elétrons no interior do material obedecem a distribuição de Fermi-Dirac,

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\exp((\varepsilon - \mu(T))/k_B T) + 1}, \quad (4.32)$$

onde $\mu(T)$ é o potencial químico e no limite de $T \rightarrow 0$ o potencial químico é igual a energia de Fermi ε_F .

OBS: Como já vimos em $T = 0$ todos os elétrons encontram-se distribuídos entre os estados de menor energia, nesta condi-

ção o mais alto nível de energia é chamado Nível de Fermi, que corresponde à maior energia que um elétron pode assumir nesta temperatura.

Um gráfico da densidade de probabilidade em função da energia para diferentes temperaturas é mostrado na Figura 4.3. A função densidade de probabilidade $f(E)$ descreve a probabilidade de um elétron ser encontrado em um intervalo de energia dE .

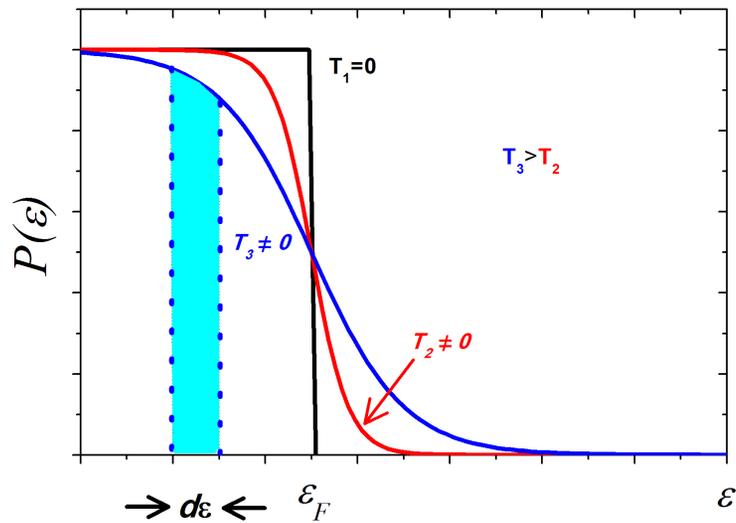


Figura 4.3: Perfil da distribuição de probabilidade em função da energia do elétrons.

Quando a temperatura está próxima do zero absoluto todos os elétrons estão distribuídos entre os níveis de menor energia e não estão disponíveis para condução. Mesmo em altíssimas temperaturas ($T \gg 0$) a maior parte dos elétrons ainda se encontram "ligados", mas uma pequena parcela deles apresenta uma energia maior que a de Fermi e encontram-se livres para conduzir eletri-

cidade e são a fonte do efeito termoiónico. Quando um elétron está a uma distância suficientemente grande da superfície de um metal, nenhum campo elétrico pode ser percebido, nesta condição dizemos que o elétron está no nível de vácuo. Esta distância pode ser apenas de alguns nanômetros dependendo do material.

A densidade de corrente obtida pelo efeito termoiónico obedece a lei de Richardson-Dushman dada por:

$$j = AT^2 e^{-\frac{\phi}{k_B T}}, \quad (4.33)$$

onde j é a densidade de corrente (A/cm²), A é uma constante dos metais, ϕ é a função trabalho (eV), k_B é a constante de Boltzmann (1.371×10^{-23} J/K) e T é a temperatura do filamento em Kelvin.

A corrente coletada pelo ânodo depende da geometria do catodo, da forma do potencial elétrico entre o anodo e o catodo dentre outros fatores. Para eletrodos planos como a válvula que usaremos em nosso experimento a densidade de corrente coletada é dada pela lei de Child,

$$j = BV^{3/2}, \quad (4.34)$$

onde B é uma constante relacionada à geometria dos eletrodos e V é a diferença de potencial entre o catodo e o anodo.

4.3 Procedimentos experimental

Para realização deste experimento serão necessários:

- Válvula termoiônica;
- Multímetros;
- Termômetro;
- Fontes de alimentação.

Dividiremos o experimento em três etapas como segue abaixo. Antes de iniciarmos o experimento vamos responder algumas perguntas para entender melhor os resultados que serão obtidos e o procedimento experimental que será adotado.

ATIVIDADES



1. Como podemos determinar a temperatura de um corpo?
2. Cite pelo menos três instrumentos usados para medir temperatura com diferentes princípios físicos.
3. Como medir temperaturas ultra elevadas? Exemplo, como podemos medir a temperatura do sol?

4. Voce sabe o que é um pirômetro?
5. Como podemos medir a temperatura do filamento de uma lâmpada incandescente?

Etapa 1: Determinação da Temperatura do Filamento

Neste experimento mediremos a temperatura do filamento termoiônico por meio de uma medida indireta, isto é, mediremos a temperatura através da medida da resistência do material. A variação da resistência com a temperatura em metais é dada por:

$$R = R_o[1 + \alpha(T - T_o)] , \quad (4.35)$$

onde R_o corresponde à resistência medida a T_o (temperatura ambiente). Para o filamento de tungstênio, o valor do coeficiente de temperatura da resistividade é $\alpha = 450 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

ATIVIDADES



1. Faça um gráfico mostrando o comportamento da resistência de um metal em função da temperatura no limite de altas e baixas $T \rightarrow 0 \text{ K}$ temperaturas.

2. Descreva o comportamento de um material semicondutor em função da temperatura e faça um gráfico. Faça o mesmo para um material isolante e supercondutor.

Procedimentos para determinação da Temperatura do Filamento

- Para obter o valor da temperatura meça diretamente o valor da resistência do filamento à temperatura ambiente R_o com ajuda de um multímetro e meça o valor da temperatura ambiente T_o usando um termômetro ou termopar.
- Monte um circuito de alimentação com corrente contínua para aquecer o filamento como indicado na Figura 4.4. Meça

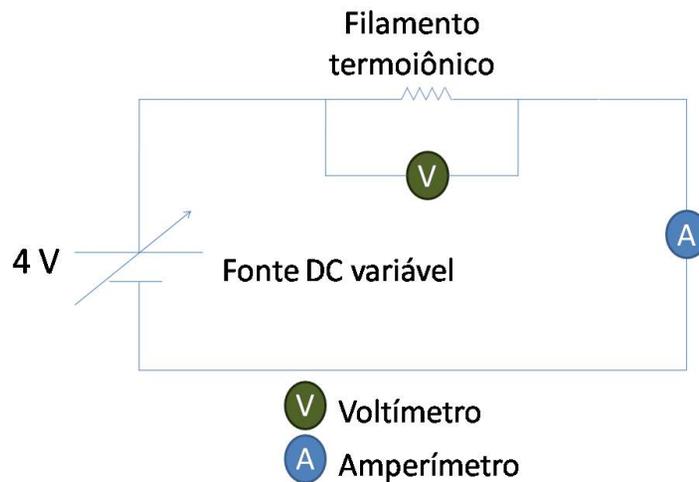


Figura 4.4: Esquema para montagem do circuito para medida da temperatura do filamento termoiônico

simultaneamente os valores da voltagem aplicada e da corrente obtida variando a voltagem do circuito de alimentação de 0 a 4.5 volts. use pelo menos 10 diferentes valores de tensão.

- Utilize a lei de ohm, calcule a resistência para cada uma destas medidas e através da Equação 4.3 obtenha a temperatura do filamento.
- Faça um gráfico da voltagem aplicada em função da temperatura do filamento para utilizar como curva de calibração nas próximas etapas.

Etapa 2: Determinação da Função Trabalho

Nesta etapa encontraremos a função trabalho do tungstênio, para isso usaremos a lei de Richardson-Dushman que relaciona diretamente a temperatura com a corrente termoiônica. Esta lei é dada pela Eq. 4.33 ($j = AT^2 e^{-\frac{\phi}{k_B T}}$).

Procedimentos para determinação da Função Trabalho

- monte o circuito como mostrado na Figura 5.1,
- Para 4 valores distintos de voltagem de aceleração, obtenha valores de densidade de corrente em função da temperatura do filamento.
- Faça gráficos adequados para obter o valor da função trabalho do tungstênio e compare-os com o valor mais aceito: 4.52 eV.

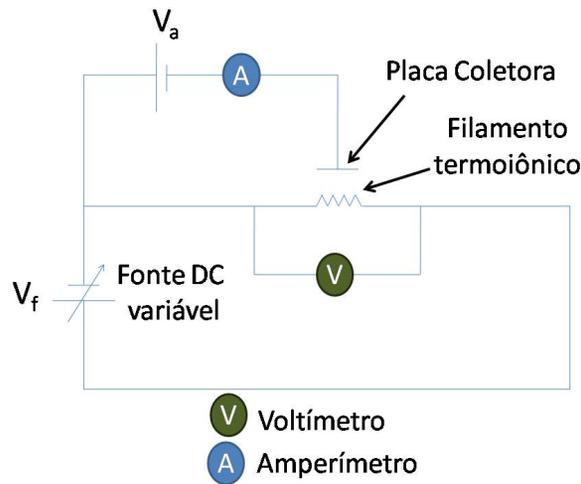


Figura 4.5: Esquema para montagem do circuito para medida da função trabalho do filamento termoiônico.

- Seria interessante o uso do tungstênio para o estudo do efeito fotoelétrico?
- Qual a energia mínima por fóton seria necessária para se obter o efeito?
- Que tipo de luz é esta?
- Seria interessante apagar a luz para fazer este experimento?

Etapa 3: Verificação da Lei de Child

A lei de Child relaciona a corrente termoiônica com a voltagem aceleradora. Naturalmente que esta corrente depende da temperatura e esta relação deverá ser aqui determinada. A lei de Child é dada pela Eq. 4.34 ($j = BV^{3/2}$).

Procedimentos para Verificação da Lei de Child

- Ainda usando o circuito montado conforme a Figura 5.1, obtenha a curva da corrente em função da voltagem de aceleração para 10 valores distintos de temperatura.
- Compare o formato destas curvas e relacione estas formas com os conceitos de carga espacial, disponibilidade de elétrons, geometria de eletrodos e livre caminho médio.
- Verifique se B se mantém constante com a temperatura.
- Para evidenciar o efeito termoiônico serão obtidas curvas de corrente versus voltagem de aceleração aplicada para variados valores de temperatura.
 - Para temperatura ambiente, obtenha cerca de 20 valores de voltagem e corrente.
 - Para mais 10 diferentes temperaturas obtenha o mesmo tipo de curva.

ATIVIDADES

1. Discuta com seus colegas e descreva como poderíamos verificar o efeito da retificação usando este dispositivo?

2. Descreva como poderíamos adaptar a montagem deste experimento para medir a razão e/m .
3. Elabore um relatório com os dados obtidos neste experimento respondendo todas as perguntas encontradas nas atividades aqui propostas. OBS: Use as recomendações para confecção do relatório dado na aula 2.



RESUMO

Na aula de hoje, verificamos através de um simples procedimento experimental o efeito termoiônico e entendemos qualitativamente como os fatores externos influenciam este efeito. Encontramos a função trabalho do tungstênio, elemento do qual é feito o filamento, e verificamos experimentalmente a lei de Richardson-Dushman e a Lei de Child.



PRÓXIMA AULA

Em nossa próxima aula faremos nosso último experimento, onde determinaremos o valor da constante de Planck. Bons estudos.

AUTO-AVALIAÇÃO

- Eu sei o que é o efeito termoiônico?
- Eu sei o que é a função trabalho de um material?
- Eu sei descrever o que acontece com a corrente termoiônica quando vario as condições do sistema como temperatura e voltagem aceleradora?



LEITURA COMPLEMENTAR



- [2] REIF, F., **Fundamentals of Statistical and Thermal Physics**, USA:Waveland Press, Inc., 2009.
- [5] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A; **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2001.
- [6] KITTEL, Charles; **Física do Estado Sólido**. 8 ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2006.
- [7] LIMA, E.F.; FOSCHINI, M.; MAGINI, M., **Efeito termoiônico: Uma Nova Proposta Experimental**, Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol.23, 391, 2001.
- [8] Notas de aula, curso de laboratório de física estatística e da matéria condensada, DFI-UFS.